



**Alexandra Rita Teixeira de Jesus**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

**Efeito das condições de fabrico e  
compactação no comportamento  
mecânico de misturas betuminosas  
temperadas**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil –  
Perfil de Urbanismo e Transportes

Orientador: Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Co-orientador: Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Vicente da Silva

Arguente: Prof. Luís Manuel Trindade Quaresma

Vogal: Prof. Doutor José Manuel Coelho das Neves



**Alexandra Rita Teixeira de Jesus**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

**Efeito das condições de fabrico e  
compactação no comportamento  
mecânico de misturas betuminosas  
temperadas**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil –  
Perfil de Urbanismo e Transportes

Orientador: Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Co-orientador: Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Mário Vicente da Silva

Arguente: Prof. Luís Manuel Trindade Quaresma

Vogal: Prof. Doutor José Manuel Coelho das Neves



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro de 2015**

“Copyright” Alexandra Rita Teixeira de Jesus, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# AGRADECIMENTOS

A realização da presente dissertação não seria possível sem a colaboração e acompanhamento de alguns intervenientes, aos quais gostaria de apresentar o meu agradecimento.

Ao meu orientador, Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo, por toda a disponibilidade, apoio e acompanhamento constante.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves, pela orientação científica ao longo do desenvolvimento deste trabalho, por toda a disponibilidade, apoio e acompanhamento constante. Agradeço também todos os esforços no sentido de mobilizar todos os recursos necessários para a realização dos ensaios.

A realização deste trabalho só foi possível graças às condições e meios disponibilizados para a realização dos ensaios no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico.

Um especial agradecimento ao técnico Rui Garcia pela disponibilidade, auxílio nos ensaios realizados e confiança depositada.

Um agradecimento às empresas José Marques Gomes Galo, S.A e Eurocálcio Calcário e Inertes, S.A. por terem disponibilizado todos os agregados necessários para a realização do presente trabalho.

À Cepsa Portuguesa Petróleos, S.A. que através do Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Instituto Superior Técnico disponibilizou o ligante betuminoso, sem o qual não teria sido possível realizar este trabalho.

Aos meus amigos e colegas, pela sua amizade e companheirismo demonstrando, em especial ao Carlos Marques por toda a paciência, apoio e motivação.

Para concluir, um sincero agradecimento aos meus pais pela educação e valores transmitidos. Assim como por todo o apoio, incentivo, preocupação e carinho constante ao longo de toda a minha vida.



# RESUMO

As Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) são misturas produzidas a temperaturas mais baixas que as tradicionais a quente, resultando na diminuição da quantidade de energia necessária durante a produção e da emissão de gases poluentes, com melhoria das condições de trabalho dos operários. Estas misturas devem apresentar um comportamento semelhante às tradicionais de modo a se obterem pavimentos com igual durabilidade.

Neste trabalho pretendeu-se investigar o efeito da variação das temperaturas de fabrico e de compactação no comportamento em serviço da mistura betuminosa. Para tal, realizou-se o estudo experimental de uma mistura betuminosa (AC 20 base), com incorporação de diferentes aditivos, produzida a temperaturas várias.

O efeito dos diferentes aditivos no comportamento reológico do betume a temperaturas elevadas foi avaliado através da medição da viscosidade dinâmica. O desempenho da mistura foi avaliado através do ensaio de deformação permanente e do ensaio de sensibilidade à água.

Os resultados do ensaio de sensibilidade à água mostram um efeito claro das temperaturas de produção na resistência da mistura, com os melhores resultados obtidos para as temperaturas sugeridas pelo produtor. Os resultados do ensaio de deformação permanente apresentam maior dependência do tipo de aditivo utilizado do que das temperaturas. Assim, conclui-se que a produção de misturas betuminosas temperadas com incorporação de aditivos não compromete o comportamento em serviço do pavimento desde que sejam utilizadas as temperaturas adequadas para esse tipo de mistura.

## **Palavras-chave:**

Misturas Betuminosas Temperadas

Aditivos

Desempenho

Temperatura de Fabrico

Temperatura de Compactação

Viscosidade





# ABSTRACT

Warm Mix Asphalt (WMA) are produced at lower temperatures than traditional hot mixtures, requiring less energy during their production, and leading to lower emissions of greenhouse gases, while also improving the working conditions. For the resulting pavements to show the same durability, these mixtures must behave similarly to traditional mixtures.

This dissertation's aim was to study the effects of variation in the fabrication and compaction temperatures in the performance of bituminous mixtures. For this purpose, an experimental study of a bituminous mixture (AC 20 base) with the addition of different additives produced at several temperatures was carried out.

The effect of the different additives on the rheological behavior of the bitumen at high temperatures was assessed through the measurement of apparent viscosity, and the mixture's performance was assessed through permanent deformation and water sensitivity tests.

The results of the water sensitivity tests showed a clear effect of the production temperature on the mixture's resistance, with the best results being obtained from the temperatures suggested by the producer. The results of the permanent deformation tests showed greater dependency on the type of additive used, than on the temperature. It was concluded that the production of WMA with the incorporation of additives does not compromise the pavement's performance as long as the adequate temperatures for the mixtures are used.

## **Keywords:**

Warm Mix Asphalt

Additives

Performance

Mix Temperature

Compaction Temperature

Viscosity



## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento do tema .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Metodologia .....	3
1.4	Organização .....	4
2	MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS .....	5
2.1	Considerações iniciais .....	5
2.2	Vantagens e desvantagens .....	8
2.3	Tecnologias de produção .....	10
2.4	Temperaturas de fabrico e compactação .....	18
2.5	Estudos de caracterização de misturas betuminosas temperadas .....	20
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	31
3.1	Introdução .....	31
3.2	Formulação das misturas betuminosas temperadas.....	31
3.2.1	Análise granulométrica dos agregados .....	32
3.2.2	Ligante betuminoso .....	36
3.3	Produção de misturas betuminosas .....	40
3.4	Baridade máxima teórica .....	42
3.5	Compactação.....	44
3.5.1	Compactação de provetes prismáticos .....	44
3.5.2	Compactação de provetes cilíndricos .....	46
3.6	Baridade aparente dos provetes compactados.....	48
3.7	Propriedades volumétricas dos provetes betuminosos.....	52
3.7.1	Porosidade.....	52
3.7.2	Volume de vazios na mistura de agregado .....	53
3.8	Ensaio Marshall .....	53
3.9	Caracterização do desempenho das misturas betuminosas.....	57
3.9.1	Ensaio de deformação permanente .....	57
3.9.2	Ensaio de escorrimento .....	60
3.9.3	Ensaio de sensibilidade à água .....	62
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	67

4.1	Viscosidade dinâmica do ligante .....	67
4.2	Características Marshall .....	68
4.2.1	Enquadramento .....	68
4.2.2	Resultados da baridade máxima teórica .....	69
4.2.3	Resultados da baridade aparente .....	69
4.2.4	Resultados do ensaio de compressão .....	72
4.3	Caracterização do desempenho das misturas betuminosas.....	74
4.3.1	Escorrimento.....	74
4.3.2	Sensibilidade à água .....	75
4.3.3	Resistência à deformação permanente.....	78
4.4	Análise comparativa com outras misturas para a camada de base.....	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	87
5.1	Conclusões .....	87
5.2	Desenvolvimentos futuros .....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91
	ANEXO A – CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS .....	97
	ANEXO B – DECLARAÇÕES DE DESEMPENHO DOS AGREGADOS .....	99
	ANEXO C – FICHAS TÉCNICAS DOS BETUMES.....	105
	ANEXO D – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SENSIBILIDADE À ÁGUA.....	107
	ANEXO E – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Composição de uma amostra de mistura betuminosa compactada [12].....	5
Figura 2.2 - Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas [14] .....	7
Figura 2.3 - Comportamento reológico dos materiais Newtonianos [9] .....	12
Figura 2.4 - Comportamento reológico <i>shear-thinning</i> (pseudoplástico) [9] .....	12
Figura 2.5 - Técnicas de produção de MBT .....	13
Figura 2.6 - Aditivo Sasobit .....	14
Figura 2.7 - Aditivo RheoFalt.....	16
Figura 2.8 - Aditivo Rediset .....	17
Figura 2.9 - Curva granulométrica da composição A [29] .....	21
Figura 2.10 - Curva granulométrica da composição B [29] .....	22
Figura 2.11 - Valores da resistência conservada em tração indireta obtidos pelos provetes não envelhecidos [29] .....	23
Figura 2.12 - Valores da resistência conservada em tração indireta obtidos pelos provetes envelhecidos [29] .....	23
Figura 2.13 - Curva granulométrica da mistura AC 20 base [16] .....	25
Figura 2.14 - Curva granulométrica da mistura e fuso adotado [10] .....	28
Figura 3.1 - Granulometria dos agregados constituintes da mistura betuminosa.....	33
Figura 3.2 - Curva granulométrica da mistura de agregados.....	35
Figura 3.3 - Conjuntos de peneiros e agitador eletromagnético .....	35
Figura 3.4 - Agregados separados pelas várias frações.....	36
Figura 3.5 - Sonda de penetração [45].....	37

Figura 3.6 - Viscosímetro Rotacional .....	38
Figura 3.7 - Esquema do Viscosímetro Rotacional .....	39
Figura 3.8 - Misturadora utilizada para a produção de misturas betuminosas .....	42
Figura 3.9 - Termómetro por infravermelhos.....	42
Figura 3.10 - Amostra de mistura betuminosa solta para o ensaio de baridade máxima teórica .....	43
Figura 3.11 - Picnómetro de vácuo com agitador eletromagnético.....	43
Figura 3.12 – Compactador de rolo ( <i>Roller Compactor</i> ) .....	44
Figura 3.13 - Molde com mistura betuminosa a compactar .....	45
Figura 3.14 - Laje compactada.....	46
Figura 3.15 - Compactador de impacto .....	47
Figura 3.16 - Provetes compactados.....	47
Figura 3.17 – Aspeto final dos provetes .....	48
Figura 3.18 – Provetes prismáticos .....	49
Figura 3.19 - Provetes cilíndricos .....	50
Figura 3.20 - Pesagem de provete cilíndrico imerso em água (esquerda) e pesagem de provete prismático imerso em água (direita) .....	50
Figura 3.21 - Selagem do provete .....	51
Figura 3.22 - Provelte selado .....	52
Figura 3.23 - Provetes antes do ensaio de compressão Marshall .....	54
Figura 3.24 - Banho termoestático com o estabilómetro e os provetes a ensaiar .....	55
Figura 3.25 - Provelte submetido ao ensaio de compressão Marshall .....	56
Figura 3.26 - Provetes após o ensaio de Marshall .....	56

Figura 3.27 - Equipamento do ensaio de resistência à deformação permanente ( <i>Whell Tracking</i> ) .....	58
Figura 3.28 - Sonda de temperatura incorporada no equipamento do ensaio de pista .....	59
Figura 3.29 - Lajes ensaiadas à deformação permanente .....	60
Figura 3.30 - Conjunto cesto e tabuleiro (esquerda) e conjunto cesto, tabuleiro e mistura betuminosa (direita) .....	61
Figura 3.31 – Provetes cilíndricos no picnómetro .....	62
Figura 3.32 - Provetes submetidos a vácuo .....	63
Figura 3.33 - Banho de água com provetes submersos .....	63
Figura 3.34 - Câmara de temperatura controlada .....	64
Figura 3.35 - Provetes acondicionados à temperatura de ensaio .....	64
Figura 3.36 - Ensaio de tração indireta .....	65
Figura 3.37 - Esquema do ensaio de tração indireta [55] .....	65
Figura 3.38 - Tipos de rotura .....	66
Figura 4.1 – Viscosidade dinâmica do ligante .....	67
Figura 4.2 - Variação da viscosidade dinâmica em função da temperatura .....	68
Figura 4.3 - Baridade máxima teórica das misturas betuminosas .....	69
Figura 4.4 – Baridade aparente das misturas betuminosas .....	70
Figura 4.5 - Porosidade dos provetes Marshall .....	71
Figura 4.6 – Volume de vazios na mistura de agregado dos provetes Marshall .....	71
Figura 4.7 - Variação da estabilidade para as diferentes temperaturas de fabrico e de compactação .....	72

Figura 4.8 - Variação da deformação para as diferentes temperaturas de fabrico e de compactação.....	73
Figura 4.9 - Variação das resistências à tração indireta .....	77
Figura 4.10 - Comparação dos resultados médios dos provetes obtidos no ensaio de resistência à deformação permanente para a mistura M3 (BT35/50) .....	80
Figura 4.11 - Representação gráfica do desenvolvimento da rodeira durante o ensaio de deformação permanente.....	81
Figura 4.12 - Fases da evolução da deformação permanente em misturas betuminosas [56] .....	82
Figura 4.13 - Resultados obtidos nos ensaios de sensibilidade à água .....	84
Figura 4.14 - Resultados obtidos nos ensaios de deformação permanente .....	85



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Temperaturas de fabrico e compactação [29] .....	22
Quadro 2.2 - Temperaturas de fabrico e compactação [16] .....	25
Quadro 2.3 - Resultados experimentais da baridade aparente e da resistência conservada em tração indireta dos provetes [16] .....	26
Quadro 2.4 - Resultados da baridade aparente, baridade geométrica e do ensaio de deformação permanente, fabricadas com as misturas em estudo [16].....	26
Quadro 2.5 - Temperaturas de fabrico e de compactação [10] .....	28
Quadro 2.6 - Resultados obtidos do ensaio de escorrimento [10] .....	29
Quadro 2.7 - Resultados obtidos no ensaio à deformação permanente [10].....	29
Quadro 3.1 - Misturas betuminosas do tipo AC 20 base estudadas.....	32
Quadro 3.2 - Identificação dos agregados .....	33
Quadro 3.3 - Composição granulométrica da mistura de agregados e fuso granulométrico .	34
Quadro 3.4 - Temperaturas orientativas recomendadas pelo fabricante para utilização do betume BT 35/50 e do betume 35/50 .....	37
Quadro 3.5 - Temperaturas do ensaio para a determinação da viscosidade dinâmica.....	39
Quadro 3.6 - Intervalos de funcionamento para a haste R2 [47] .....	40
Quadro 3.7 - Temperaturas de fabrico e compactação.....	41
Quadro 3.8 - Requisitos/Propriedades para as camadas do tipo AC 20 base [13] .....	54
Quadro 4.1 - Resultados obtidos do ensaio do escorrimento das misturas betuminosas .....	74
Quadro 4.2 - Características dos provetes sujeitos ao ensaio de sensibilidade à água.....	75
Quadro 4.3 - Características volumétricas das lajes ensaiadas .....	79

Quadro 4.4 - Propriedades obtidas do ensaio Marshall para as misturas em análise.....	83
---	----

# ÍNDICE DE SIGLAS E SÍMBOLOS

<b>Sigla</b>	<b>Significado</b>
AC	Asphalt Concrete (Betão betuminoso)
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CE	Conformité Européene (Conformidade Europeia)
CETO	Caderno de Encargos Tipo Obra
EN	European Norm (Norma Europeia)
EP	Estradas de Portugal, S.A.
GEE	Gases com Efeito de Estufa
HAP	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
IST	Instituto Superior Técnico
ITS <sub>w</sub>	Indirect Tensile Strength of Wet Group (Resistência à Tração Indireta do Subconjunto Húmido)
ITS <sub>d</sub>	Indirect Tensile Strength of Dry Group (Resistência à Tração Indireta do Subconjunto Seco)
ITSR	Indirect Tensile Strength Ratio (Resistência à Tração Indireta)
LVCT	Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes
M1	Mistura betuminosa AC 20 Base 35/50 com Sasobit
M2	Mistura betuminosa AC 20 Base 35/50 com Rediset
M3	Mistura betuminosa AC 20 Base 35/50 com Betume Temperado
M4	Mistura betuminosa AC 20 Base 35/50 com RheoFalt
MB	Macadame Betuminoso

MBC	Mistura Betuminosa Convencional
MBQ	Mistura Betuminosa a Quente
MBT	Mistura Betuminosa Temperada
NP	Norma Portuguesa
PG	Performance Grade
PRD <sub>AIR</sub>	Mean Proportional Ruth Depth in Air (Percentagem da Profundidade Média de Rodeira)
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
rpm	Rotações por minuto
RD <sub>AIR</sub>	Mean Rut Depth in Air (Profundidade de Rodeira)
Superpave	Superior PERforming asphalt PAVEments
VMA	Voids in Mineral Aggregates (Volume de vazios na mistura de agregados)
WMA	Warm Mix Asphalt
WTS <sub>AIR</sub>	Wheel Tracking Slope (Taxa de Deformação no Ensaio de Pista ao Ar)

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
B	Conteúdo de ligante betuminoso
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
D	Percentagem de material escorrida para o tabuleiro
D <sub>máx</sub>	Máxima dimensão do agregado
F	Deformação de Marshall
P	Carga de pico

$V_m$	Porosidade
$\rho_{bssd}$	Baridade de um provete saturado com superfície seca
$\rho_{bssea}$	Baridade de um provete selado
$\rho_{mv}$	Baridade máxima teórica da mistura
$\rho_w$	Massa volúmica da água



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do tema

A rede rodoviária representa um papel fundamental para o desenvolvimento das sociedades, dado ser a principal infraestrutura responsável pela mobilidade de transporte de mercadorias como de pessoas entre centros urbanos e rurais, contribuindo assim para o desenvolvimento socioeconómico do país.

O aumento do tráfego rodoviário, das cargas transportadas e das exigências de comodidade e de segurança de circulação, determinou a necessidade de pavimentos com melhor desempenho mecânico. De forma a responder às novas exigências, surgiram melhorias recentes no desempenho das misturas betuminosas através do desenvolvimento de novas tecnologias de produção e aplicação dos betuminosos em geral [1].

Estudos indicam uma forte relação entre temperaturas de produção das misturas e a libertação de fumos e gases. Assim com a redução da temperatura de produção, menor será a libertação de fumos garantindo melhores condições de trabalho [2].

Ao longo dos últimos anos, especialmente após a adoção do protocolo de Quioto, tem-se verificado uma preocupação com a diminuição das emissões de gases com efeitos de estufa (GEE) nos vários setores da construção. Desta forma o setor rodoviário, nomeadamente no âmbito da pavimentação, tem desenvolvido esforços no sentido de diminuir os impactos negativos das tecnologias de produção de misturas betuminosas e assim alcançar objetivos económicos e ambientais [3]. Como resultado para atingir estes objetivos surgiram melhorias ao nível de produção e aplicação de misturas betuminosas. Estas melhorias passam pela diminuição de energia durante todo o processo de fabrico das misturas betuminosas sem comprometer o desempenho mecânico das mesmas. Neste contexto surgem as misturas betuminosas temperadas (MBT) [4].

Os trabalhos de pavimentação são responsáveis por grande parte das emissões de gases poluentes. A quantidade de poluentes libertados é consideravelmente maior quando são utilizadas misturas betuminosas fabricadas a quente (MBQ) [5]. Com efeito, para alcançar a trabalhabilidade desejada e garantir tempo suficiente para compactar a mistura, a produção de MBQ envolve temperaturas acima dos 140°C, necessárias para secagem e aquecimento dos agregados [6].

Neste contexto, as MBT apresentam benefícios comparativamente com as MBQ e que têm contribuído para o seu desenvolvimento. Na produção MBT existe uma vasta gama de temperaturas utilizadas, são geralmente produzidas num intervalo de temperaturas de 100°C a 140°C [7].

A diminuição da temperatura de fabrico das MBT permite uma redução da energia consumida e de emissão de GEE. Deste modo, esta tecnologia possibilita que as centrais de produção de misturas betuminosas se situem em zonas urbanas. Os benefícios técnicos por parte das MBT são igualmente relevantes. Pavimentação a temperaturas inferiores mantendo a densidade desejada, proporciona maiores distâncias de transporte garantindo trabalhabilidade durante a aplicação e compactação, e, ainda, a necessidade de menor tempo de arrefecimento, conduzindo a uma abertura mais rápida ao tráfego [8].

A qualidade da mistura betuminosa, e por sua vez o futuro desempenho do pavimento rodoviário, ao longo do ciclo de vida, está intimamente associada a dois processos condicionantes: fabrico e compactação. A necessidade de se analisar as temperaturas de fabrico e compactação prende-se a questões de nível económico, social, ambiental e qualidade tanto no processo de fabrico como de compactação. A temperatura é um dos fatores mais condicionantes destes dois processos referidos, pois influencia uma das características mais importantes do ligante betuminoso, a viscosidade. A viscosidade é que permite ao betume envolver, de forma adequada, os agregados durante o processo de fabrico da mistura e, após a compactação, formar uma estrutura compacta, impermeável e coesa [9].

A presente dissertação surge no seguimento de dois estudos realizados anteriormente: o primeiro estudo realizado no âmbito de uma dissertação de mestrado [10] avaliou o comportamento de uma MBT quando produzida a temperaturas típicas de uma MBQ e analisou a influência da temperatura de fabrico na compactação da mistura betuminosa; o segundo estudo foi realizado no âmbito de uma tese de doutoramento [11] e teve como principal objetivo o estudo de misturas betuminosas incorporando aditivos, com a finalidade de reduzir a temperatura de fabrico, e resíduos industriais em substituição de parte dos agregados naturais.

## **1.2 Objetivos**

O principal objetivo desta dissertação é a análise do efeito da variação das temperaturas de fabrico e de compactação no comportamento de uma MBT – AC 20 base 35/50 – com incorporação de diferentes aditivos, de utilização corrente na construção e reabilitação de pavimentos em Portugal.



A influência da temperatura de fabrico e da temperatura de compactação foi avaliada ao nível do comportamento do betume modificado pelos aditivos e do desempenho da mistura betuminosa, antes e após a sua compactação.

### **1.3 Metodologia**

Para a concretização dos objetivos propostos foi estruturada uma metodologia com as seguintes cinco fases de trabalho:

1. Na primeira fase efetuou-se o estudo dos conceitos mais importantes relacionados com o tema, nomeadamente, os constituintes de MBT, as vantagens e desvantagens da sua aplicação, as várias tecnologias de produção deste tipo de misturas e a análise do comportamento mecânico das mesmas, mediante estudos realizados anteriormente no âmbito da presente dissertação.
2. A segunda fase consistiu na caracterização de todos os componentes da mistura betuminosa (ligante, agregados e aditivos). No caso do betume, realizou-se o ensaio de viscosidade dinâmica para análise do comportamento a diferentes temperaturas de ensaio.
3. Na terceira fase procedeu-se a ensaios enquadrados no estudo de formulação Marshall, de forma a confirmar o enquadramento das propriedades mecânicas (resistência e deformabilidade Marshall) e volumétricas finais das MBT em estudo, para formulações adotadas, nos requisitos estabelecidos no Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO). Desta forma, realizaram-se os ensaios de baridade aparente, baridade máxima teórica e de compressão Marshall na mistura em estudo – AC 20 base 35/50 – com incorporação de vários aditivos, para diferentes temperaturas de fabrico e compactação.
4. Na quarta fase foram realizados ensaios de desempenho da mistura betuminosa: escorrimento do betume; sensibilidade à água; e deformação permanente.
5. A quinta e última fase correspondeu à análise comparativa do desempenho das várias combinações estudadas para as misturas betuminosas – aditivos, temperaturas de fabrico e temperaturas de compactação – tendo como base os resultados dos ensaios realizados na avaliação das propriedades selecionadas.

## 1.4 Organização

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, os quais são descritos de seguida:

- No capítulo 1 - Introdução - é feito o enquadramento do tema em estudo, apresentando de uma forma geral a importância das MBT. São ainda apresentados os objetivos, a metodologia utilizada e uma descrição do conteúdo da dissertação.
- No capítulo 2 - Misturas Betuminosas Temperadas - é efetuada uma breve abordagem aos principais constituintes das misturas betuminosas e caracterização das mesmas. Neste capítulo são também enumeradas as vantagens e desvantagens da utilização das MBT e descrevem-se as várias tecnologias para a sua produção. Por último apresenta-se uma síntese dos estudos já realizados, sobre este tipo de misturas betuminosas.
- No capítulo 3 - Programa Experimental descrevem-se todas as atividades experimentais desenvolvidas em laboratório, nomeadamente a caracterização dos materiais utilizados, formulação das misturas, descrição dos equipamentos utilizados e procedimentos de ensaios adotados no estudo do comportamento da mistura betuminosa.
- No capítulo 4 - Apresentação e Discussão de Resultados - apresentam-se e analisam-se os resultados laboratoriais obtidos de forma a compreender a influência que as temperaturas de fabrico e de compactação tiveram nas várias situações selecionadas para o estudo do desempenho das misturas betuminosas. Complementa-se este capítulo com uma análise comparativa dos resultados de desempenho das misturas betuminosas produzidas na presente dissertação e das misturas betuminosas (temperadas e convencionais) apresentadas em trabalhos da bibliografia.
- No capítulo 5 - Considerações Finais - são apresentadas as principais conclusões resultantes do estudo, bem como sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros no âmbito do tema do presente trabalho.

## 2 MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS

### 2.1 Considerações iniciais

As misturas betuminosas encontram-se presentes na grande maioria da rede rodoviária nacional, pois é constituída maioritariamente por pavimentos flexíveis. A composição das misturas betuminosas é determinante para o seu comportamento futuro. De forma a garantir o comportamento adequado das misturas betuminosas é de extrema importância o estudo dos seus componentes e da sua composição volumétrica [12].

Os componentes da mistura betuminosa são os agregados e o ligante betuminoso, conforme ilustrado na Figura 2.1, existindo naturalmente ar nos espaços deixados por estes componentes. De forma a melhorar as características das misturas betuminosas podem ser incorporados aditivos à mistura. Estes componentes são doseados de forma volumétrica ou ponderal, sendo misturados, posteriormente, em central de produção [12].

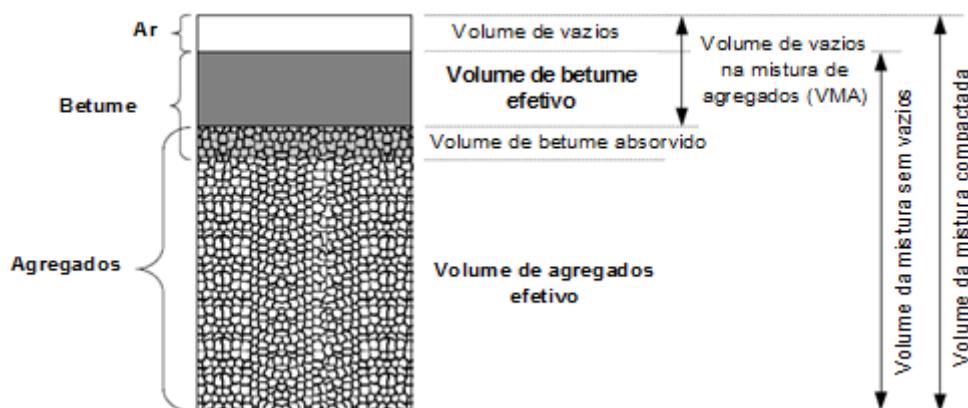


Figura 2.1 - Composição de uma amostra de mistura betuminosa compactada [12]

O betume apresenta boas qualidades adesivas permitindo a ligação entre os agregados e confere à mistura betuminosa coesão, impermeabilidade, trabalhabilidade e durabilidade [12].

O agregado é o material granular na construção e pode ser natural, artificial ou reciclado. Estes representam grande parte do volume das misturas betuminosas. Os primeiros são materiais de origem mineral que foram sujeitos apenas a processamento mecânico (exemplo: areias de rio). O agregado artificial é um agregado de origem mineral resultante de um processamento industrial (britados ou semi-britados). O agregado reciclado é um agregado proveniente do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção (exemplo: resultantes da demolições de edifícios), este tipo de

agregados tem o objetivo de contribuir para uma construção sustentável, indo ao encontro das políticas dirigidas à gestão dos resíduos de construção e demolição, que se encontram em vigor em Portugal [13]. A utilização de agregados nas misturas betuminosas tem como objetivo a formação de um esqueleto pétreo que permite a absorção de grande parte dos esforços provocado pelo tráfego [1].

A qualidade dos materiais e os processos de construção são os fatores que mais condicionam o desempenho futuro do pavimento. Por este motivo, é crucial também uma especial atenção à fase de formulação, fabrico e compactação das misturas betuminosas. Desta forma, o estudo da composição das misturas betuminosas é fundamental para um desempenho adequado em serviço, pelo que se deve caracterizar todos os materiais utilizados para a sua produção [12].

As misturas betuminosas, normalmente, são classificadas em função da temperatura de produção e da técnica de produção [14].

Na Figura 2.2 encontra-se a classificação das misturas betuminosas segundo a temperatura de produção em central e do consumo de combustível necessário para a sua produção. Pode observar-se quatro tipos de misturas betuminosas: misturas betuminosas a frio, semi-temperadas, temperadas e quentes.

As misturas betuminosas a frio são produzidas à temperatura ambiente, sem aquecimento dos agregados, e com emulsões de betume ou betume espuma. A diminuição da viscosidade do ligante betuminoso é obtida através da sua emulsão com água [15]. As emulsões betuminosas são constituídas por dois líquidos imiscíveis: betume e água. As emulsões betuminosas advêm da dispersão do betume em água: o ligante betuminoso fica disperso no meio contínuo formado pela água sob a forma de pequenos glóbulos; mantém-se estável através de um emulsionante que se distribui à volta dos glóbulos de betume; e estabelece uma carga elétrica que repele as dos outros glóbulos [1].

As misturas semi-temperadas são produzidas a temperaturas inferiores a 100°C. Geralmente são fabricadas entre os 70°C e os 100°C, com o aquecimento dos agregados à mesma temperatura que a temperatura de fabrico da mistura. Este tipo de mistura pode ser produzida com recurso a emulsões betuminosas ou betume [14].

As MBT são produzidas a temperaturas entre os 100°C e os 140°C. As temperaturas de mistura dependem essencialmente da tecnologia de produção da mistura, como também do tipo de aditivo incorporado, que permite a redução de viscosidade efetiva do ligante, garantindo o envolvimento adequado dos agregados durante o processo de fabrico e compactação, a baixas temperaturas [4].

As MBQ, designadas habitualmente por misturas betuminosas tradicionais ou convencionais, são normalmente produzidas a temperaturas entre os 150°C e os 180°C, em função do tipo de ligante utilizado na mistura. O consumo de combustível para este tipo de mistura é bastante mais elevado comparativamente com as outras misturas betuminosas, pois o ligante betuminoso à temperatura ambiente apresenta uma viscosidade elevada, desta forma. Desta forma, é necessário aquecê-lo a temperaturas elevadas para garantir o envolvimento adequado dos agregados com o ligante [16].

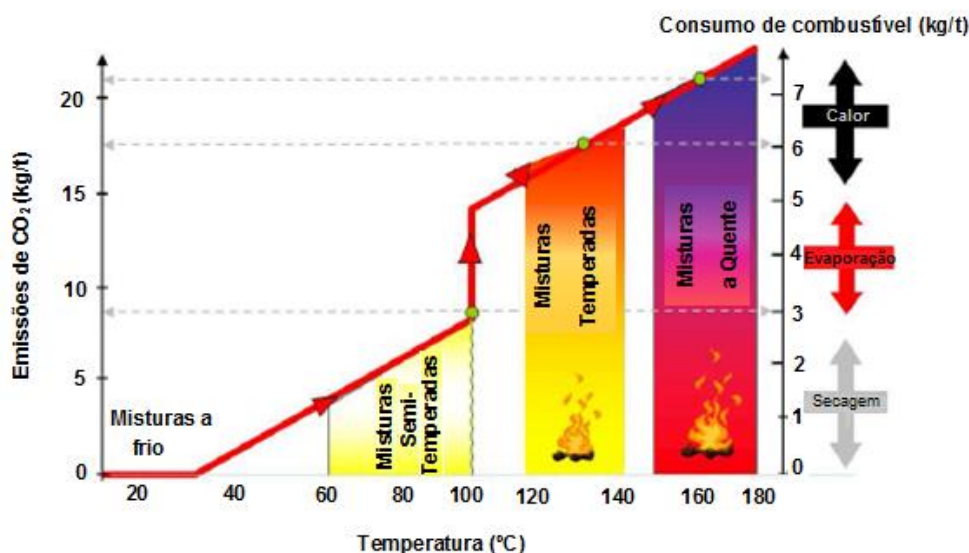


Figura 2.2 - Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas [14]

A necessidade de analisar as temperaturas de fabrico deve-se ao facto das maiores poupanças energéticas, no âmbito da construção rodoviária, advirem da redução das elevadas temperaturas durante a fase de produção das misturas betuminosas [14]. No processo de fabrico de MBQ há um elevado consumo energético para a secagem dos agregados, a temperaturas superiores a 140°C.

No sentido de melhorar os processos ao nível do consumo de recursos e de forma a torná-los ambientalmente sustentáveis, sem alterar o desempenho das misturas betuminosas, têm sido desenvolvidas as misturas betuminosas temperadas que permitem a diminuição das temperaturas de fabrico e de compactação, apresentando desta forma inúmeros benefícios ao nível económico, social e ambiental.

A redução da temperatura de fabrico e da temperatura de compactação é possível através da incorporação de aditivos na mistura betuminosa, originando uma redução da viscosidade do ligante betuminoso e garantindo o envolvimento adequado dos agregados com o ligante.

## **2.2 Vantagens e desvantagens**

A diminuição das temperaturas de produção e compactação das misturas betuminosas apresentam vários benefícios. Estes benefícios podem ser agrupados em quatro categorias [4].

A descrição das vantagens e desvantagens da utilização de MBT irá ser feita da seguinte forma: a primeira categoria compreende os benefícios de natureza ambiental; a segunda categoria inclui as de ordem técnica; em terceiro lugar as de ordem económica; e em quarto lugar, os benefícios sociais. Por fim, são descritas as desvantagens da utilização das MBT.

### **Benefícios ambientais**

A redução do consumo de recursos energéticos e, consequentemente a diminuição de emissões de GEE, são as principais vantagens deste tipo de misturas, comparativamente às MBQ [17].

Estudos relatam que a produção de MBT gera uma diminuição do consumo de energia de 20 a 35% comparativamente com o fabrico das MBQ. A redução do consumo de energia é dependente de vários fatores, nomeadamente, o teor em água dos agregados, do tipo de central e da tecnologia de produção das MBT. A poupança de energia pode ser aproximadamente equivalente a 1,5 a 2,0 litros de combustível por tonelada de material. A redução de GEE está intimamente associada à redução de consumo de energia, isto é, uma redução de 20 a 35% traduz, aproximadamente, uma redução de 4,1 a 5,5 kg de CO<sub>2</sub> equivalente, por tonelada de mistura [17].

Ao longo dos últimos anos, o foco na sustentabilidade gerou avanços tecnológicos na melhoria do desempenho das misturas betuminosas, como também, nos materiais e sistemas de pavimentação. A indústria do sector de infraestruturas de transportes tem feito progressos consideráveis, nomeadamente, nos materiais de pavimentação que contribuam para a sustentabilidade ambiental como é o caso da incorporação de subprodutos industriais e dos processos de produção de misturas que apresentem menor risco para a saúde e segurança dos trabalhadores [17].

### **Benefícios técnicos**

Uma das vantagens da utilização de MBT é a sua aplicação a baixas temperaturas garantindo uma boa compactação. Esta característica deste tipo de misturas é resultante da boa trabalhabilidade apresentada pelas MBT. Desta forma é possível aumentar as distâncias de transporte e a duração das viagens, assim como alargar as margens de temperaturas de compactação das misturas betuminosas sem hipotecar bons desempenhos [18].

A redução de temperatura de fabrico deste tipo de misturas origina um menor endurecimento do ligante betuminoso. A menor oxidação do betume conduz a uma adequada compactação, o que resulta numa menor rigidez da camada do pavimento [8].

A tecnologia de produção de MBT pode ser vantajosa em casos de elevada taxa de incorporação de material reciclado, pois desta forma a mistura terá melhor trabalhabilidade, devido à redução da viscosidade do ligante, garantindo uma boa compactação da mistura [2]. Por outro lado ao incorporar taxas elevadas de material reciclado é conseguida maior preservação de recursos naturais existentes, devido à diminuição da quantidade de recursos naturais não renováveis utilizados.

Outra mais-valia de ordem técnica é a maior rapidez na abertura ao tráfego das vias constituídas com misturas betuminosas temperadas, devido ao facto destas misturas betuminosas serem aplicadas a menores temperaturas, atingindo rapidamente as condições necessárias para a circulação de veículos [4].

Comparativamente com as misturas betuminosas a frio, as MBT apresentam como vantagem não necessitarem de tempo de cura antes de abertura ao tráfego e de uma camada de selagem superficial, como acontece com as misturas betuminosas a frio [11].

As MBT apresentam ainda melhores comportamentos em serviços, comparativamente com as misturas betuminosas a frio, uma vez que o envolvimento do agregado com o ligante é melhor e mais eficaz neste tipo de misturas facilitando os processos de espalhamento e compactação [11].

### **Benefícios económicos**

Relativamente aos benefícios económicos por parte da utilização de MBT, estes advêm da redução da temperatura de produção o que origina uma diminuição do consumo de combustíveis e, consequentemente, numa redução nos custos energéticos [11]. Como referido anteriormente, esta poupança a nível económico depende do tipo e do grau de humidade dos agregados. Contudo, esta redução encontra-se também dependente do tipo de combustível utilizado nas centrais de produção das misturas e do respetivo custo unitário do momento [19].

### **Benefícios sociais**

Estudos da bibliografia demonstram uma forte relação entre temperaturas de produção das misturas e a libertação de fumos e gases. Desta forma a exposição aos agentes nocivos é menor na produção de MBT. Ensaios aos componentes voláteis do betume/fumos demonstram uma redução significativa em relação às misturas convencionais. Os resultados mostram uma redução de cerca de 30 a 50% de

hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), aerossóis e fumos. A redução de fumos e gases resulta em melhores condições de trabalho dos operários, pois com a diminuição de temperatura de produção das misturas é proporcionado aos trabalhadores temperaturas amenas de trabalho. Com a diminuição de emissões de gases poluentes é possível uma maior proximidade das centrais betuminosas aos centros urbanos [4].

### **Desvantagens da utilização das MBT**

Existem algumas reservas quanto aos custos globais de produção das MBT, pelo facto de algumas tecnologias de produção exigirem um investimento inicial na compra de equipamento para adaptação da central de fabrico, tal como a compra dos aditivos, fundamentais na redução da temperatura de produção deste tipo de misturas betuminosas. Desta forma é importante efetuar uma avaliação de custos, de forma a garantir que os ganhos obtidos com a redução da temperatura de fabrico da mistura superam os custos de produção iniciais [8].

As MBT permitem a redução das emissões de gases poluentes, devido à diminuição substancial da temperatura durante o processo de fabrico. Contudo, a produção dos aditivos a incorporar nas misturas gera emissões de gases e neste sentido surgem algumas preocupações relativamente aos benefícios de ordem ambiental relacionados com este tipo de mistura [8].

## **2.3 Tecnologias de produção**

Atualmente existem inúmeras tecnologias disponíveis para a produção de misturas betuminosas temperadas. A utilização de aditivos nas misturas betuminosas não é um conceito recente. Nos últimos vinte anos na Alemanha têm sido utilizadas ceras com o intuito de melhorar a trabalhabilidade da mistura betuminosa e não com a finalidade da diminuição das temperaturas durante o processo de fabrico e compactação [20].

Contudo, a importância de diminuir as temperaturas de fabrico e compactação deve-se ao impacto que as misturas betuminosas apresentam tanto a nível económico, como social e ambiental. Desta forma, as várias tecnologias de produção de MBT apresentam como objetivo principal a redução da temperatura de produção e de compactação da mistura através da incorporação de aditivos, garantindo a mesma ou melhor, trabalhabilidade que uma mistura betuminosa convencional [20].

Normalmente os aditivos utilizados no fabrico das misturas betuminosas temperadas encontram-se em estado sólido à temperatura ambiente, sob a forma de pastilhas ou granulado. Existem também alguns aditivos em estado líquido mas, porém, a maior parte das vezes apresentam um período de validade inferior aos aditivos no estado sólido [11].



Em geral os aditivos podem ser adicionados de duas formas à mistura: podem ser adicionados ao betume pré-aquecido, durante alguns segundos, com o auxílio de um misturador de baixa rotação, posteriormente ao betume aditivado procede-se, então, à mistura com os agregados; ou, outra forma será adicionar o aditivo à mistura, já na misturadora, logo após à adição do betume aos agregados [11].

Os betumes puros são utilizados na produção de misturas betuminosas a quente. Este tipo de misturas, como referido anteriormente, é produzido a temperaturas elevadas porque à temperatura ambiente a viscosidade apresentada pelo ligante betuminoso não confere trabalhabilidade suficiente à mistura para o envolvimento adequado dos agregados com o betume [20].

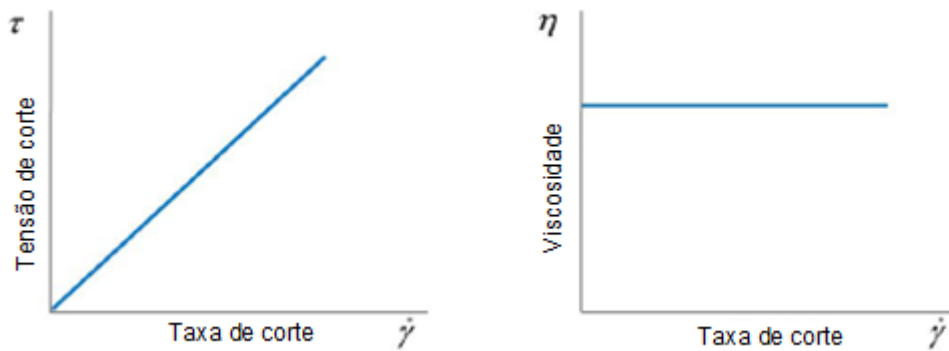
O ligante betuminoso é um material termoplástico porque a sua consistência varia com a temperatura, condicionando assim o comportamento mecânico da mistura betuminosa. A mistura pode apresentar um comportamento que varia de viscoso a elástico, consoante a temperatura e as condições de carregamento a que se encontra sujeita [21].

A viscosidade do betume é considerada a característica mais importante do betume, pois permite conhecer o comportamento reológico do ligante em diferentes condições de temperatura. A forma como esta varia com a taxa de corte, a uma determinada temperatura, define o comportamento reológico do betume [21].

Devido à necessidade de conferir menor suscetibilidade térmica e maior flexibilidade às misturas betuminosas surgiram os betumes modificados. Estes são obtidos através da incorporação de aditivos ao betume puro, alterando as suas características iniciais. Os ligantes modificados são o resultado da incorporação de aditivos (aditivos de adesividade, anti-oxidantes, entre outros), ou por polímeros (plastómeros, elastómeros sintéticos ou naturais, borrachas recuperadas, fibras orgânicas e inorgânicas, resinas e endurecedores) [12].

O tipo de comportamento reológico do betume é caracterizado pela forma como a viscosidade varia com a taxa de corte, a uma determinada temperatura. Os betumes puros apresentam um comportamento reológico Newtoniano. Os betumes modificados têm um comportamento não-Newtoniano do tipo *shear-thinning* [22].

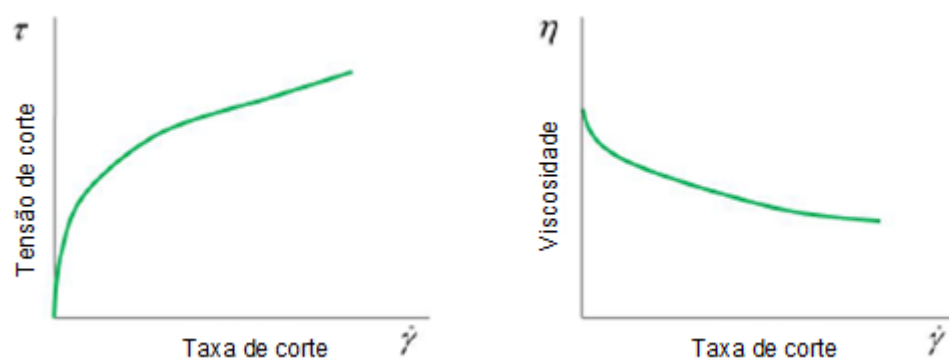
O comportamento Newtoniano é independente da taxa de corte e do tempo de carregamento. Este é um tipo de comportamento ideal, em que a variação entre a taxa de corte e a tensão de corte é linear, e a viscosidade toma um valor constante sendo independente da taxa de corte [21], como se pode observar na Figura 2.3.



**Figura 2.3 - Comportamento reológico dos materiais Newtonianos [9]**

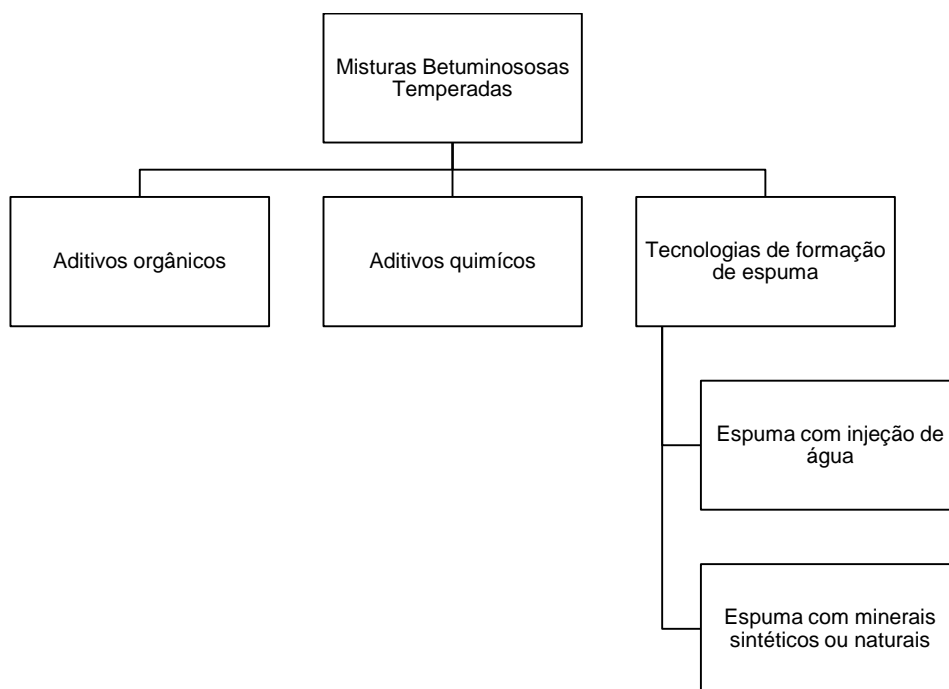
O comportamento dos betumes modificados é caracterizado pela variação entre a tensão de corte e a taxa de corte não ser linear e a viscosidade variar apenas com a taxa de corte. Estas características apresentadas pelos betumes modificados são independentes do tempo [22].

O comportamento *shear-thinning* é caracterizado por uma diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de corte [22], como encontra representado na Figura 2.4.



**Figura 2.4 - Comportamento reológico *shear-thinning* (pseudoplástico) [9]**

Apesar de existirem várias tecnologias para a produção de misturas betuminosas estas podem ser classificadas em três grupos: utilização de aditivos orgânicos, aditivos químicos e tecnologias de formação de espuma [11]. A Figura 2.5 ilustra estas tecnologias.



**Figura 2.5 - Técnicas de produção de MBT**

Na presente dissertação os aditivos incorporados na mistura betuminosa foram o Sasobit, o RheoFalt, o Rediset e um betume temperado 35/50 da Cepsa. Por este motivo realizou-se um estudo mais aprofundado destes componentes.

- **Aditivos orgânicos**

Os aditivos orgânicos são formados por ceras orgânicas com o intuito de reduzir a viscosidade do ligante betuminoso a temperaturas superiores a 90°C. Este tipo de aditivo encontra-se em estado sólido à temperatura ambiente e apresenta um ponto de fusão de 100°C. Após a cristalização do aditivo, que é obtida com o arrefecimento do ligante betuminoso, forma-se uma estrutura em rede de partículas microscópicas, que contribui para o aumento de rigidez do betume. Desta forma, o tipo de cera deve ser escolhido criteriosamente para que a temperatura em serviço do pavimento não ultrapasse a temperatura de amolecimento do aditivo. Os aditivos orgânicos mais utilizados no fabrico de misturas betuminosas temperadas são o Sasobit e o Asphaltan B [7].

#### **Sasobit®**

Este aditivo orgânico é um produto da *Sasol Wax* da África do Sul, é um *Fischer-Tropsch* (F-T) ou cera sintética produzida pelo aquecimento do carvão ou gás natural com vapor de água, na presença de um catalisador [23].

O Sasobit apresenta, como principal característica um elevado ponto de amolecimento, aproximadamente aos 100°C, sendo completamente solúvel no ligante betuminoso para temperaturas superiores a 120°C [24]. A presença deste aditivo na mistura betuminosa permite diminuir a viscosidade do ligante betuminoso, durante o processo de fabrico e de compactação, garantindo a trabalhabilidade da mistura e diminuição da temperatura de fabrico e de compactação [23]. Consequentemente, com a redução da temperatura há uma diminuição dos custos de produção, das emissões de gases poluentes e cria-se melhores condições de trabalho para os operários. O Sasobit contribui, também, para o aumento da resistência à deformação, como foi referido anteriormente. Após o arrefecimento do ligante betuminoso o aditivo cristaliza e forma uma estrutura em rede de partículas microscópicas, que contribui, também, para o aumento da rigidez do ligante [17], [25].

Na Figura 2.6 pode observar-se o aspeto físico do Sasobit, que se apresenta no estado sólido sob a forma de pequenas esferas de cor branca.



**Figura 2.6 - Aditivo Sasobit**

### **Asphaltan B**

Asphaltan B é uma cera da *Romonta GmbH*, Alemanha. Este tipo de aditivo é caracterizado por ser uma mistura de ceras com base em componentes de cera de Montana, obtida do carvão castanho com recurso a um solvente, e um conteúdo de hidrocarbonetos de elevado peso molecular [6].

*Romonta GmbH* recomenda a adição de 2 a 4% de Asphaltan B ao betume, em peso. A sua adição à mistura betuminosa é feita de forma semelhante à incorporação de Sasobit [16].

Este tipo de aditivo melhora as propriedades do ligante a temperaturas reduzidas e aumenta a resistência às deformações permanentes, sendo o seu ponto de amolecimento de, aproximadamente, 100°C [6].

## RheoFalt LT-70

Este aditivo orgânico produzido pela *Ventraco Chemie B.V.*, Holanda, é uma mistura de ceras de parafina, resinas sintéticas de hidrocarbonetos, polímeros termoplásticos e inibidores de oxidação. Este aditivo produz um efeito plastificante do betume, conduzindo a uma redução da sua viscosidade. Desta forma, é possível a redução das temperaturas de fabrico e compactação de cerca de 30°C a 40°C, comparativamente às MBQ. Isto significa que a temperatura de produção apresenta uma gama de variação entre os 70°C e os 140°C [26].

O RheoFalt LT-70 apresenta um ponto de amolecimento de 68°C. As ceras utilizadas, usualmente, apresentam um ponto de amolecimento de cerca de 115°C, sendo este um ponto de amolecimento elevado para um aditivo cujo objetivo é a diminuição de temperatura de fabrico e compactação [26].

O aditivo é completamente solúvel no ligante betuminoso para temperaturas superiores a 110°C. Por recomendação do fabricante, as temperaturas de fabrico e compactação devem situar-se na gama de valores de 110°C a 140°C [26], [27].

Este tipo de aditivo pode ser adicionado diretamente à mistura betuminosa no misturador ou previamente ao ligante betuminoso, tal como o Sasobit e o Asphaltan B. Neste último caso deve ser garantida a dispersão ótima do aditivo no ligante betuminoso, com recurso a um misturador de baixa velocidade antes da mistura com os agregados. A quantidade de aditivo normalmente incorporada na mistura é cerca de 2 a 4% da massa do ligante [28].

As mais-valias desta técnica consistem na diminuição do envelhecimento do betume devido, à redução das temperaturas de fabrico e compactação, e ao aumento da trabalhabilidade conferida à mistura betuminosa, possibilitando o aumento da distância de transporte das misturas betuminosas [26], [29].

Na Figura 2.7, pode observar-se o aditivo RheoFalt que se apresenta sob a forma de partículas sólidas de pequenas dimensões de cor branca.



**Figura 2.7 - Aditivo RheoFalt**

- **Aditivos Químicos**

Os aditivos químicos visam a melhoria do recobrimento do agregado pelo ligante segundo uma série de mecanismo, a baixas temperaturas. Estes aditivos melhoram as propriedades de afinidade do ligante betuminoso ao agregado [30].

Os agentes tensioativos (ou surfactantes) quando adicionados no processo de mistura promovem a redução da tensão superficial na interface agregados/ligante e diminuem o ângulo de contacto das partículas de betume com o agregado. O principal objetivo dos aditivos químicos não é a redução da viscosidade do ligante betuminoso, mas incrementar o recobrimento dos agregados pelo betume, mesmo a baixas temperaturas [30], [16].

#### **Rediset®**

O Rediset é um aditivo químico da *Akzo Nobel*, Holanda, constituído por uma combinação de surfactantes químicos e orgânicos que modificam o comportamento reológico do betume. Os surfactantes melhoram o envolvimento dos agregados pelo ligante, e os restantes componentes do aditivo reduzem a viscosidade do ligante [30].

O Rediset contribui para uma redução da temperatura de fabrico e de compactação da mistura de cerca de 15°C. Normalmente, a quantidade de aditivo adicionado à mistura betuminosa varia de 1,5 a 2% da massa do ligante [30].

O Rediset apresenta-se a sob a forma de partículas sólidas de pequenas dimensões de cor castanha, tal como se pode observar na Figura 2.8.



**Figura 2.8 - Aditivo Rediset**

- **Tecnologias de formação de espuma de betume**

As tecnologias de produção de espuma de betume são divididas em duas classes: uma à base de água e outra contendo água. No primeiro caso, a água é adicionada ao ligante betuminoso por meio de um equipamento específico que permite a injeção de água sobre a forma de *spray* no betume quente, permitindo gerar espuma. O segundo processo é uma técnica de formação de espuma que utiliza um mineral, sintético ou natural, como fonte de água criando um efeito de espuma [8].

#### **Espuma com injeção de água**

Existe uma variedade de técnicas disponíveis de formação de espuma, com o intuito de reduzir a viscosidade do betume. Muitas das técnicas disponíveis passam pela introdução de pequenas quantidades de água (cerca de 2% da massa do betume) ao ligante betuminoso aquecido. A injeção de água pode ser sob a forma de *spray* no betume quente, ou pela adição de uma fração de agregados finos húmidos [7].

A água vaporiza-se e o vapor libertado origina uma expansão, temporária, do volume do betume conduzindo à redução da viscosidade do mesmo. Gradualmente o betume vai regressar às suas características originais. Porém este fenómeno possibilita um bom recobrimento do agregado pelo ligante, a temperaturas reduzidas [7], [16].

No que diz respeito a processos de espuma de betume por injeção de água, tem-se nomeadamente o WMA Foam, Double Barrel, Low Energy Asphalt (LEA), LEAB e Ultrafoam GX [14].

## **Espuma com minerais sintéticos ou naturais**

Neste tipo de processo, na mistura betuminosa são incorporados minerais sintéticos ou naturais, que apresentam como base a utilização de zeólitos. Os zeólitos pertencem ao grupo de minerais, aluminosilicatos hidratados e alcalimetals. Estes minerais contêm na sua estrutura cerca de 20% de água retida, que é libertada quando submetidos a aquecimento acima do ponto de ebulição da água. Quando em contacto com o ligante betuminoso, estes minerais criam um efeito controlado de espuma, originando o aumento de volume do ligante. Este aumento de volume conduz a uma redução da viscosidade. A formação de espuma resulta numa melhor trabalhabilidade da mistura e contribui para a redução da temperatura de produção compactação em cerca de 30°C [7].

As características principais que diferenciam os zeólitos naturais dos sintéticos, para além do processo químico envolvido na produção de zeólitos sintéticos, é o rácio sílica/alumínio, que nos zeólitos naturais é de 5:1 e nos sintéticos é de 1:1. Atualmente, grande parte dos zeólitos são minerais sintéticos, sendo os zeólitos mais comercializados: Aspha-min e Advera [13].

Este tipo de tecnologia, comparativamente com as tecnologias de injeção de água, produz menor quantidade de vapores de água, e consequentemente a expansão do betume é menor do que a obtida na tecnologia de injeção de água [4].

## **2.4 Temperaturas de fabrico e compactação**

A temperatura apresenta uma grande importância nos processos de fabrico e de compactação, pois encontra-se intrinsecamente ligada à viscosidade do betume, contribuindo para a qualidade do envolvimento dos agregados, a trabalhabilidade e para a baridade final, refletindo-se no comportamento futuro do pavimento [9].

O ligante betuminoso apresenta um comportamento viscoelástico. A altas temperaturas o ligante comporta-se como um líquido viscoso, a baixas temperaturas apresenta um comportamento sólido elástico, e a temperaturas intermédias apresenta um comportamento viscoelástico [21].

### **Temperatura de fabrico**

Durante o processo de fabrico das misturas betuminosas, em primeiro lugar os agregados são secos e aquecidos. Posteriormente os agregados e o betume betuminoso são aquecidos à temperatura de fabrico. De seguida, envolve-se os agregados com o ligante betuminoso na misturadora, sendo que esta também deve encontrar-se à temperatura de produção da mistura betuminosa [31].



Durante o processo de fabrico da mistura betuminosa pretende-se que o betume apresente a viscosidade necessária para que envolva adequadamente os agregados, formando assim uma estrutura coesa [31],[32]. Desta forma, a temperatura de fabrico não deve ser muito elevada, pois o ligante betuminoso iria apresentar uma viscosidade baixa, dando origem ao seu escorrimento. Contudo se a temperatura for muito baixa, o ligante betuminoso terá uma viscosidade alta, o que não possibilita um bom envolvimento dos agregados [9].

### **Temperatura de compactação**

Após a fase de produção da mistura betuminosa, segue-se o processo de compactação, em que a temperatura de compactação apresenta igualmente grande influência no comportamento futuro da mistura betuminosa.

Durante a fase de compactação, a temperatura deve permitir a reorientação das partículas de agregado revestidas de betume, resultando no aumento da área de contacto entre as partículas e na diminuição do volume de vazios. Esta reorganização contribui para a formação de uma estrutura coesa, resistente (devido ao aumento de pontos de contacto) e estável (melhor organização das partículas). Estas características dependem da espessura de filme de betume que envolve as partículas de agregado, que é função da quantidade de betume e da viscosidade do betume. Contudo a viscosidade do betume depende do tipo de betume e da temperatura de fabrico [33].

Para temperaturas de compactação baixas, o ligante betuminoso é muito viscoso, pelo que reduz de forma significativa a trabalhabilidade da mistura, devido ao aumento da resistência ao movimento dos agregados, tornando o processo de compactação significativamente mais difícil [32], [33].

Por outro lado, para temperaturas muito elevadas, a viscosidade é baixa, o ligante é muito fluido e a mistura betuminosa não apresenta coesão e, portanto, não conseguirá resistir aos esforços provocados pelos cilindros, dando origem a compactações e descompactações sucessivas [33].

### **Metodologias de determinação das temperaturas**

A determinação das temperaturas de fabrico e de compactação faz-se através de intervalos de viscosidade com o intuito de serem alcançadas as características ótimas das misturas [9].

Os métodos Superpave e o da Shell, entre outros, são utilizados para determinar as temperaturas de mistura e de compactação com recurso a intervalos de viscosidade, sendo que estes foram desenvolvidos para betumes puros. Estes métodos, quando aplicados a betumes modificados, não

apresentam resultados satisfatórios, pois resultam em temperaturas demasiado elevadas, devido aos betumes modificados apresentarem elevadas viscosidades [34].

#### a) Método Superpave

O método Superpave (*SUperior PERforming asphalt PAVements*) segue as recomendações definidas pelo Asphalt Institute desde 1962, para a determinação das temperaturas de fabrico e compactação de acordo com os intervalos de viscosidade. A determinação da viscosidade é obtida com recurso ao viscosímetro rotacional, a temperaturas de 135°C e de 165°C a uma taxa de corte de 6,8 s<sup>-1</sup>. As temperaturas de mistura e de compactação para um intervalo de valores de viscosidade de cinemática de 170±20 cSt e 280±30 cSt, respetivamente. Segundo o projeto Superpave, os intervalos definidos pelo Asphalt Intitute mantêm-se, com exceção das unidades, que surgem agora no Sistema Internacional, sendo representativas da viscosidade dinâmica, em 0,17±0,02 Pa.s e 0,28±0,03 Pa.s [35], [36].

O presente método serve de referência na determinação de temperaturas de fabrico e compactação, sendo este apenas de aplicação laboratorial [9].

#### b) Método da Shell

De acordo com o método da Shell, a temperatura do processo de fabrico da mistura é determinada para uma viscosidade de aproximadamente 0,20 Pa.s. Para a fase de compactação é definido um intervalo de valores de viscosidade de 2,0 Pa.s a 20 Pa.s. O motivo para este intervalo apresentar uma maior amplitude deve-se ao facto do presente método ser direccionado para obra e ter em consideração os inúmeros fatores que influenciam a compactação em obra, nomeadamente, condições atmosféricas, vento, espessura da camada e tipo de compactação [31].

## 2.5 Estudos de caracterização de misturas betuminosas temperadas

As tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas são relativamente recentes. Contudo, existem diversos trabalhos que contribuíram para o estudo e desenvolvimento das misturas betuminosas temperadas.

De seguida, descrevem-se três trabalhos desenvolvidos no âmbito da incorporação de aditivos nas misturas betuminosas para redução das temperaturas de fabrico e de compactação, assim como os diversos ensaios desenvolvidos e seus resultados. Desta forma, pretende-se expor os resultados obtidos experimentalmente através dos ensaios efetuados laboratorialmente para uma posterior análise comparativa (apresentada no Capítulo 4).

## Estudo 1

O primeiro estudo apresentado foi descrito num artigo intitulado “*Long term performance of warm mix asphalt versus hot mix asphalt*” [29]. O principal objetivo deste estudo foi avaliar os resultados obtidos dos ensaios de fadiga, de tração indireta e do módulo resiliente, para as misturas betuminosas temperadas, assim como para a mistura betuminosa a quente, a diferentes níveis de envelhecimento.

Naquele estudo foi comparado o desempenho de uma mistura convencional, com o de uma mistura com incorporação de Sasobit e com o de uma mistura com incorporação de RheoFalt.

A mistura analisada era composta por agregados de origem calcária e por um ligante asfáltico PG 64-22. As misturas estudadas apresentam duas composições granulométricas diferentes, a composição A encontra-se representada na Figura 2.9, e a composição B encontra-se representada na Figura 2.10.

A percentagem ótima de ligante betuminoso para a composição A foi de 4,8% e para a composição B foi de 5,1%. Estes valores foram utilizados tanto para a mistura convencional como para as misturas betuminosas temperadas.

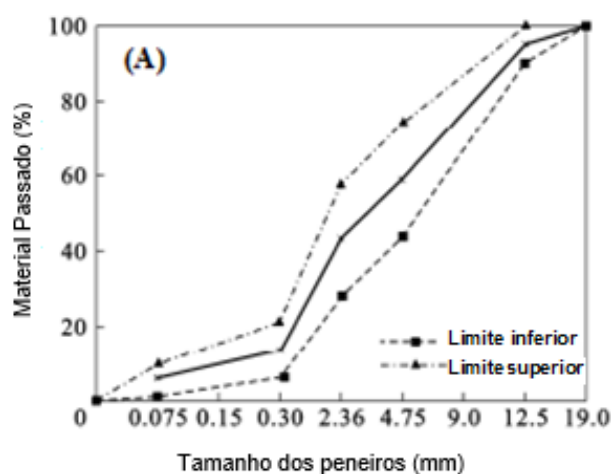
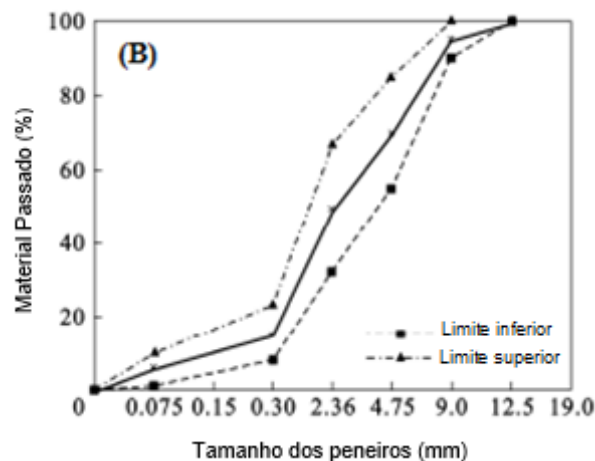


Figura 2.9 - Curva granulométrica da composição A [29]



**Figura 2.10 - Curva granulométrica da composição B [29]**

O Quadro 2.1 apresenta as temperaturas de fabrico e compactação das misturas betuminosas.

**Quadro 2.1 - Temperaturas de fabrico e compactação [29]**

Tipo de Mistura Betuminosa	Temperatura de fabrico (°C)	Temperatura de compactação (°C)
Mistura Convencional	165	135
Mistura com adição de RheoFalt	135	110
Mistura com adição de Sasobit	135	110

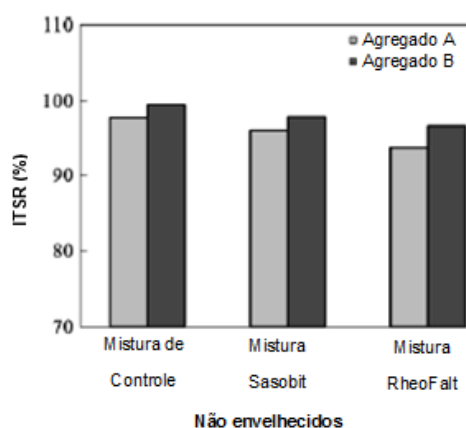
As percentagens de aditivos incorporados nas misturas betuminosas temperadas foram de 2,5% de Sasobit e 4% de RheoFalt do peso do betume.

Foram realizados diversos ensaios, como por exemplo o ensaio de fadiga, o ensaio de sensibilidade à água e o ensaio de determinação do módulo de deformabilidade. Apenas serão analisados, nesta dissertação, o ensaio de tração indireta, dado ser o único que será utilizado como termo de comparação.

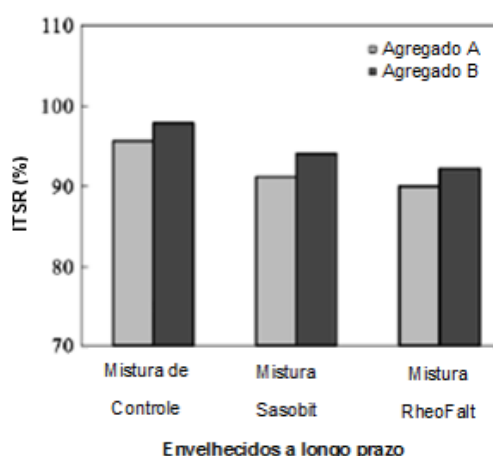
O ensaio de tração indireta consistiu na aplicação de uma carga de compressão ao longo do eixo diametral do provete cilíndrico, até a sua rotura. Os provetes cilíndricos a ensaiar apresentam um diâmetro de 100 mm. Metade dos provetes foram envelhecidos artificialmente na estufa para simular o envelhecimento a curto e a longo prazo de acordo com a *AASHTO R30-02*.

Na avaliação da sensibilidade à água, os provetes cilíndricos foram submersos em água a uma temperatura de 60°C durante um período de 24 horas, de seguida os provetes foram submersos num banho de água a uma temperatura de 25°C durante 2 horas. O ensaio de tração indireta foi realizado nos provetes molhados e secos com o intuito de avaliar a resistência conservada em tração indireta (ITSR). Para avaliação do efeito de envelhecimento no valor de resistência à tração indireta, os provetes foram fabricados em quatro níveis diferentes de envelhecimento. Todos os provetes foram ensaiados a uma temperatura de 20°C.

O ITSR foi utilizado para avaliar a sensibilidade à água por parte de cada uma das misturas. As Figuras 2.11 e 2.12 mostram os valores da resistência conservada em tração indireta obtidos pelos provetes, não envelhecidos e envelhecidos, respetivamente.



**Figura 2.11 - Valores da resistência conservada em tração indireta obtidos pelos provetes não envelhecidos [29]**



**Figura 2.12 - Valores da resistência conservada em tração indireta obtidos pelos provetes envelhecidos [29]**

Pelos resultados obtidos, neste estudo constatou-se que todas as misturas apresentam uma resistência conservada superior a 80% e que a incorporação de aditivos às misturas betuminosas não apresenta influência significativa nos valores obtidos de ITSR, comparativamente com a mistura convencional. Constatou-se que os provetes envelhecidos da mistura aditivada com RheoFalt apresentaram valores de ITSR inferiores, comparativamente com as outras misturas.

## **Estudo 2**

O segundo estudo baseou-se numa dissertação de mestrado intitulada “Estudo do desempenho de materiais alternativos na pavimentação rodoviária – O caso das misturas betuminosas temperadas” [16].

Este estudo teve como objetivo efetuar uma análise comparativa do desempenho de uma mistura convencional do tipo AC 20 base, com três misturas betuminosas temperadas com a mesma composição mas com a incorporação de diferentes tipos de aditivos comerciais, uma com incorporação de 4% Sasobit, outra incorporação de 2% Rediset, uma mistura com a incorporação de 1,5% Rediset e 1,5% Viatop, e por fim uma mistura betuminosa convencional (MBC). Porém, apenas a mistura com incorporação de Sasobit e a mistura com incorporação de Rediset serão alvo de estudo, dado que são os aditivos abordados na presente dissertação.

Naquele trabalho foi realizado um estudo Marshall com intuito de determinar a percentagem ótima de betume da mistura e posteriormente realizaram-se os ensaios de sensibilidade à água, de acordo com a norma EN 12697-12 [37], e de deformação permanente, segundo a norma EN 12697-22 [38]. Apenas serão abordados o ensaio de sensibilidade à água e o ensaio de deformação permanente por serem os ensaios realizados na presente dissertação.

Os parâmetros de composição (tipo de agregados, curva granulométrica, tipo e percentagem de ligante) mantiveram-se constantes nas quatro misturas estudadas, diferindo apenas a percentagem de aditivo e as temperaturas de fabrico e compactação.

A Figura 2.13 apresenta a curva granulométrica e o fuso granulométrico da mistura, do tipo AC 20 base, de acordo com o especificado na norma NP EN 13108-1 [39].

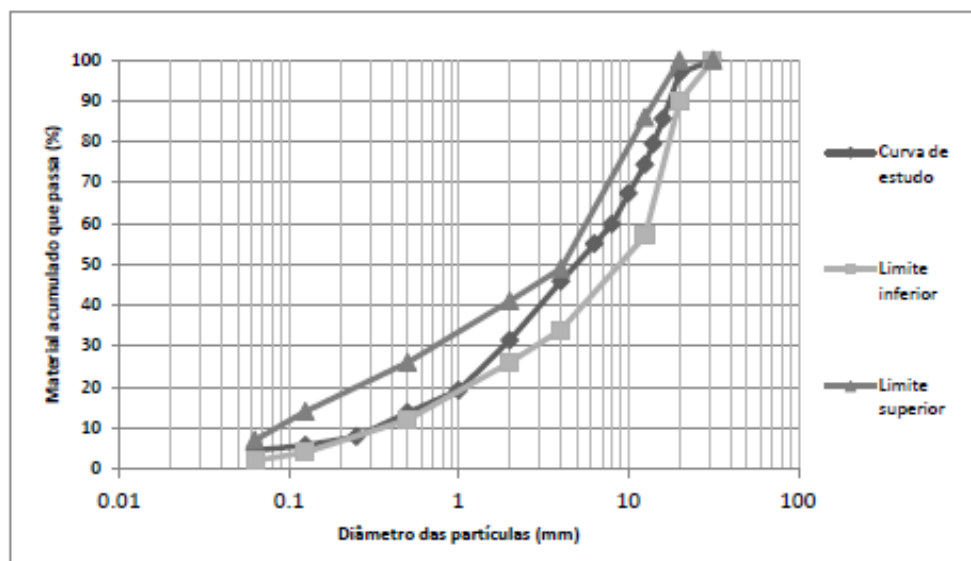


Figura 2.13 - Curva granulométrica da mistura AC 20 base [16]

Foi realizado o estudo de formulação Marshall de forma a determinar a percentagem ótima de ligante betuminoso da mistura. Foi concluído que a percentagem ótima de ligante era de 4,5%, cumprindo desta forma todas as especificações do caderno de encargos. Posteriormente, para a percentagem ótima de betume determinada, efetuou-se os ensaios de sensibilidade à água e de deformação permanente. O Quadro 2.2 apresenta as temperaturas de fabrico e compactação das misturas betuminosas estudadas.

Quadro 2.2 - Temperaturas de fabrico e compactação [16]

Tipo de Mistura Betuminosa	Temperatura de fabrico (°C)	Temperatura de compactação (°C)
MBC	150	140
Mistura com adição de Sasobit	120	100
Mistura com adição de Rediset	120	100

O Quadro 2.3 apresenta os resultados obtidos para a resistência conservada em tração indireta, bem como do ensaio da baridade aparente.

**Quadro 2.3 - Resultados experimentais da baridade aparente e da resistência conservada em tração indireta dos provetes [16]**

Mistura / Aditivo	Baridade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	ITSR (%)
<b>MBC</b>	2321	73,8
<b>MBT Sasobit</b>	2239	42,4
<b>MBT Rediset</b>	2269	49

Analisando os resultados obtidos, pode constatar-se que o valor do ITS<sub>R</sub> das misturas betuminosas temperadas foi inferior ao da mistura betuminosa convencional, isto é, houve uma diminuição da resistência à água por parte das misturas betuminosas temperadas. Os valores obtidos para a baridade aparente não apresentaram grande variação, contudo os valores da baridade das MBT é inferior à baridade da MBC, devido à diminuição da temperatura de produção e compactação dos provetes.

O Quadro 2.4 apresenta os resultados obtidos do ensaio de deformação permanente assim como os valores da baridade aparente das lajes fabricadas com as misturas betuminosas analisadas.

**Quadro 2.4 - Resultados da baridade aparente, baridade geométrica e do ensaio de deformação permanente, fabricadas com as misturas em estudo [16]**

Mistura / Aditivo	Baridade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	RD <sub>AIR</sub> (mm)	PRD <sub>AIR</sub> (0,01%)	WTS <sub>AIR</sub> (m/10 <sup>3</sup> )
<b>MBC</b>	2334	7,8	12,4	0,33
<b>MBT Sasobit</b>	2284	2,2	3,4	0,06
<b>MBT Rediset</b>	2335	3,4	5,6	0,1

No que respeita aos resultados obtidos no ensaio da resistência à deformação permanente relativamente às MBT, verifica-se que estas apresentaram uma maior resistência, nomeadamente a mistura com incorporação de Sasobit apresentou uma profundidade de rodeira bastante inferior em relação às restantes MBT. As restantes MBT apresentaram igualmente uma boa resistência à deformação permanente comparativamente à MBC. Através do ensaio de resistência à deformação permanente foi possível confirmar que a incorporação de aditivos na mistura betuminosa influenciou positivamente o desempenho da mistura.



Relativamente aos resultados obtidos da baridade aparente, o resultado experimental da mistura betuminosa com incorporação de Sasobit foi ligeiramente inferior aos valores obtidos para as restantes misturas, o que sustenta o bom desempenho apresentado por esta mistura relativamente a este ensaio.

### **Estudo 3**

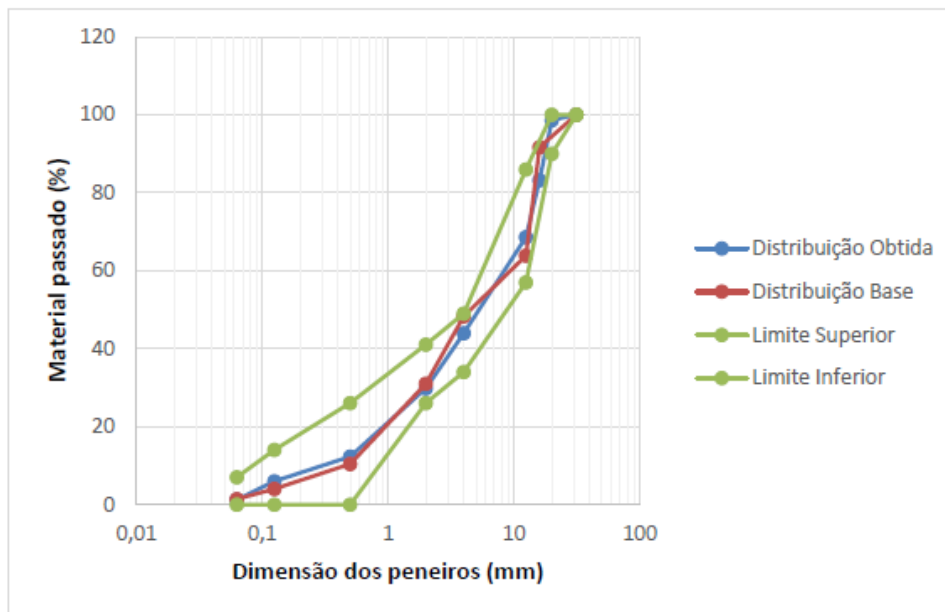
O terceiro estudo baseia-se na dissertação de mestrado intitulada “Fabrico e compactação de misturas betuminosas temperadas” [10] e teve como objetivo a avaliação da influência da temperatura durante a fase de produção e compactação no comportamento das misturas betuminosas temperadas.

Aquele trabalho realizou uma análise comparativa do desempenho das misturas betuminosas, através do ensaio de escorrimento, de acordo com a norma EN 12697-18 [40], da avaliação da composição volumétrica e do ensaio de deformação permanente, segundo a norma EN 12697-22 [38].

Foram realizados ensaios experimentais em laboratório com o intuito de comparar uma mistura convencional e uma mistura temperada, ambas do tipo AC 20 base 35/50, com a mesma composição, mas com a incorporação de aditivos comerciais diferentes, uma com 4% de Sasobit e outra com 2% do aditivo químico Rediset. As misturas betuminosas são constituídas por agregados calcários fornecidos pela pedreira José Marques Gomes Galo S.A., Sesimbra, e por betume 35/50 fornecido pela Cepsa.

Como referido anteriormente, os parâmetros de composição (tipo de agregados, curva granulométrica, tipo e percentagem de ligante) mantiveram-se constantes nas misturas estudadas, diferindo apenas a percentagem de aditivo e as temperaturas de fabrico e compactação.

A Figura 2.14 apresenta a composição granulométrica da mistura em estudo, assim como os fusos granulométricos para uma mistura do tipo AC 20 base de acordo com o especificado na norma NP EN 13108-1 [39].



**Figura 2.14 - Curva granulométrica da mistura e fuso adotado [10]**

Apresenta-se de forma resumida, no Quadro 2.5, as temperaturas de fabrico e de compactação para as misturas betuminosas temperadas com incorporação de Sasobit e com incorporação de Rediset.

**Quadro 2.5 - Temperaturas de fabrico e de compactação [10]**

Tipo de Mistura Betuminosa	Temperatura de fabrico (°C)	Temperatura de compactação (°C)
Misturas Betuminosas Temperadas	165	150
		120
	120	120
		100

No ensaio de escorrimento foi adotado o método do cesto descrito norma EN 12697-18 [40]. Este ensaio teve por objetivo determinar a quantidade de ligante que se deposita no fundo da mistura durante o seu transporte. A temperatura de ensaio foi igual à temperatura de fabrico acrescida de 15°C. O Quadro 2.6 apresenta os resultados obtidos do ensaio de escorrimento.

**Quadro 2.6 - Resultados obtidos do ensaio de escorrimento [10]**

	Mistura Convencional		MBT Sasobit		MBT Rediset	
Temperatura de Fabrico (°C)	165	120	165	120	165	120
D (%)	0,000	0,000	0,013	0,000	0,017	0,019

Com base nos resultados experimentais obtidos do ensaio de escorrimento, aquele estudo concluiu que as misturas sem a incorporação de aditivos não apresentaram escorrimento do ligante. No entanto, as misturas aditivadas apresentaram um valor baixo de escorrimento, o que foi expectável na medida em que a incorporação de aditivos à mistura betuminosa contribuiu, segundo o autor, para a redução da viscosidade do ligante betuminoso garantindo desta forma uma melhor trabalhabilidade da mistura.

Naquele estudo foi realizado também o ensaio de deformação permanente ( $WTS_{AIR}$ ) para diferentes temperaturas de fabrico e de compactação da mistura betuminosa. O Quadro 2.7 apresenta os resultados ao ensaio de deformação permanente.

**Quadro 2.7 - Resultados obtidos no ensaio à deformação permanente [10]**

Mistura	Temperatura Fabrico / Compactação	Baridade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	RD <sub>AIR</sub> (mm)	WTS <sub>AIR</sub> (m/10 <sup>3</sup> )
MBT Sasobit	165°C/150°C	2280	2,73	0,104
	165°C/120°C	2253	4,92	0,173
	120°C/120°C	2248	6,84	0,364
	120°C/100°C	2253	4,38	0,505
MBT Rediset	165°C/150°C	2219	10,67	0,604
	165°C/120°C	2244	(1)	(1)
	120°C/120°C	2194	(1)	(1)
	120°C/100°C	2233	(1)	(1)

<sup>(1)</sup> Ensaios que não foram concluídos, por ter sido atingida a profundidade máxima de rodeira (20mm).

Analizando os resultados obtidos no ensaio de deformação permanente, foi concluído que o desempenho das MBT a este ensaio é dependente das temperaturas de fabrico e de compactação. Com a diminuição da temperatura de fabrico e de compactação a deformação permanente aumentou significativamente. A mistura com incorporação de Rediset apresentou um menor desempenho no ensaio de deformação permanente, pois não completou o ensaio. Este terminou antes dos 10 000 ciclos de carga por ter sido atingida a profundidade de rodeira de 20 mm, o que revela o mau comportamento desta mistura a este ensaio.

## **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1 Introdução**

O presente capítulo apresenta o programa experimental para a produção de uma mistura betuminosa, com o objetivo de avaliar o desempenho e o comportamento mecânico, quando produzidas com diferentes aditivos e com temperaturas de fabrico e compactação diferentes. Neste estudo as únicas variáveis em análise são o tipo de aditivo e as temperaturas de produção e de compactação. Tanto o tipo de agregado, como a curva granulométrica mantiveram-se constantes nas quatro misturas estudadas.

Todo o trabalho experimental foi desenvolvido no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes (LVCT) do Instituto Superior Técnico, que disponibilizou todos os materiais e equipamentos para a realização dos ensaios.

No presente capítulo são descritos todos os temas relacionados com os ensaios laboratoriais, nomeadamente, os materiais utilizados, formulação das misturas betuminosas, a descrição dos equipamentos utilizados, assim como todos os métodos e procedimentos seguidos nos ensaios.

### **3.2 Formulação das misturas betuminosas temperadas**

A formulação das misturas betuminosas estudadas foi realizada no âmbito de uma tese de doutoramento intitulada “Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação Tecnológica” realizada por Fernando Martinho, cujo objetivo foi o estudo de misturas com incorporação de aditivos para reduzir a temperatura de produção e de RCD's (resíduos de construção e demolição) de forma a reduzir o consumo de agregados [11].

A mistura estudada é do tipo AC 20 base 35/50 e encontra-se de acordo com a norma NP EN 13108-1 [39], e é constituída por agregados calcários da pedreira José Marques Gomes Galo, S.A. em Sesimbra.

No presente trabalho realizou-se o estudo experimental, em laboratório, de uma mistura betuminosa com incorporação de diferentes aditivos produzida a temperaturas várias. A mistura betuminosa foi designada consoante o tipo de aditivo incorporado, de M1 (aditivo Sasobit®), M2 (aditivo Rediset®), M3 (Betume Temperado 35/50 CEPESA) e M4 (aditivo RheoFalt LT-70).

Para a realização do presente estudo foram utilizados dois betumes de pavimentação, com gama de penetração 35/50, fornecidos pela Cepsa. Um dos betumes de pavimentação utilizado no presente trabalho foi modificado pelo fabricante, com recurso a um óleo de processo de natureza sintética. O betume de pavimentação puro foi modificado, em laboratório, com a incorporação dos aditivos referidos anteriormente, consoante as misturas.

O aditivo Rheofalt LT-70 e o betume temperado da Cepsa foram escolhidos para integrarem o programa experimental do presente trabalho, pois envolvem tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas relativamente recentes, pelo que ainda não existem estudos suficientes que avaliem o comportamento desempenhado pelas misturas betuminosas com a incorporação destes produtos.

As percentagens de aditivos, tipo e percentagem de betume utilizados em cada uma das misturas betuminosas, obtidas pelo estudo de Marshall realizado por Martinho [11], encontram-se resumidas no Quadro 3.1.

**Quadro 3.1 - Misturas betuminosas do tipo AC 20 base estudadas**

<b>Identificação da mistura</b>	<b>Tipo de betume</b>	<b>% de betume</b>	<b>RheoFalt (%)</b>	<b>Rediset (%)</b>	<b>Sasobit (%)</b>
<b>M1</b>	Betume 35/50	4,5	-	-	4
<b>M2</b>	Betume 35/50	4,5	-	2	-
<b>M3</b>	Betume Temperado 35/50	4,5	-	-	-
<b>M4</b>	Betume 35/50	4,5	4	-	-

Em todas as misturas foi utilizado fíler comercial, de origem calcária fornecida pela pedreira Eurocálcio Calcário e Inertes, S.A., Fátima.

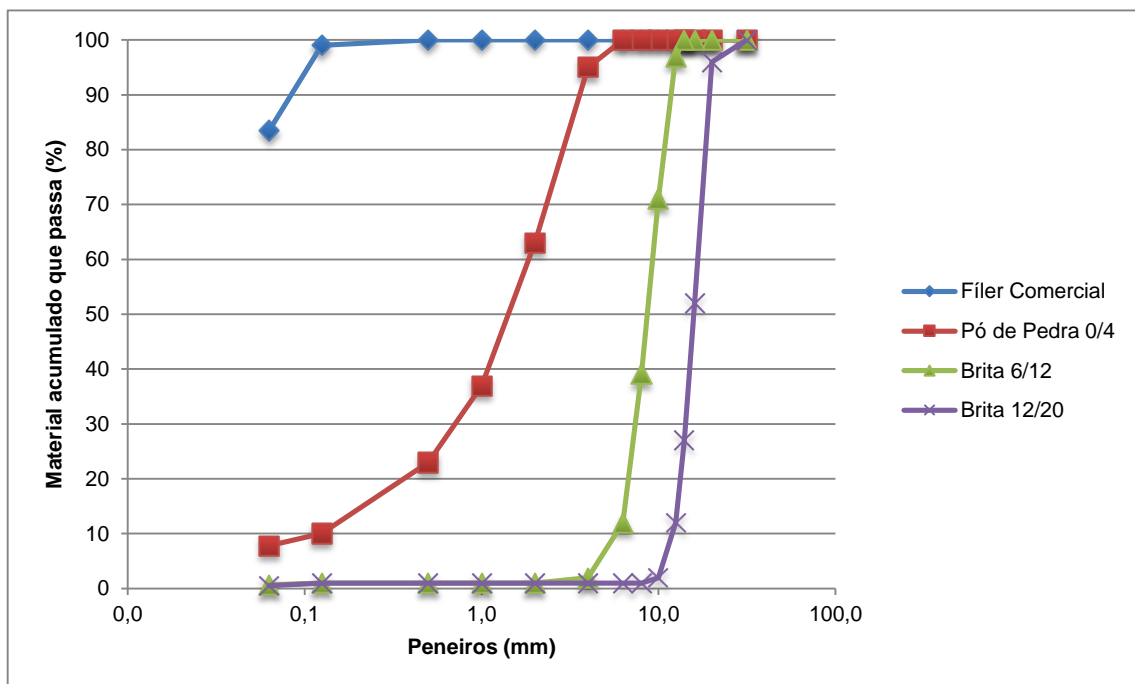
### **3.2.1 Análise granulométrica dos agregados**

De acordo com o Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) das Estradas de Portugal S.A. [13], a composição granulométrica de cada mistura betuminosa deve conter, no mínimo, três frações granulométricas distintas. Desta forma, os agregados utilizados nas misturas betuminosas, da presente dissertação, apresentam as seguintes dimensões nominais: Brita 12/20 mm, Brita 6/12 mm, Pó de pedra 0/4 mm e fíler comercial. No Quadro 3.2 encontram-se identificados a origem de cada agregado, natureza e frações granulométricas.

**Quadro 3.2 - Identificação dos agregados**

Agregado	Pedreira	Natureza	Fração Granulométrica (mm)
<b>Fíler Comercial</b>	Eurocálcio - Fátima	Calcário	<0,063
<b>Pó de Pedra</b>	José Marques Gomes Galo - Sesimbra	Calcário	0/4
<b>Brita 6/12</b>	José Marques Gomes Galo - Sesimbra	Calcário	6/12
<b>Brita 12/20</b>	José Marques Gomes Galo - Sesimbra	Calcário	12/20

A Figura 3.1 apresenta as curvas granulométricas de cada agregado (Anexo A). As propriedades exigidas pela norma NP EN 13043 [41] foram testadas e atestadas pelo produtor nas declarações de desempenho dos agregados presentes no anexo B.



**Figura 3.1 - Granulometria dos agregados constituintes da mistura betuminosa**

A formulação da mistura “AC 20 base (MB) – Macadame Betuminoso” foi obtida segundo a composição de determinadas percentagens de agregados adotados, de forma a obter uma mistura de agregados

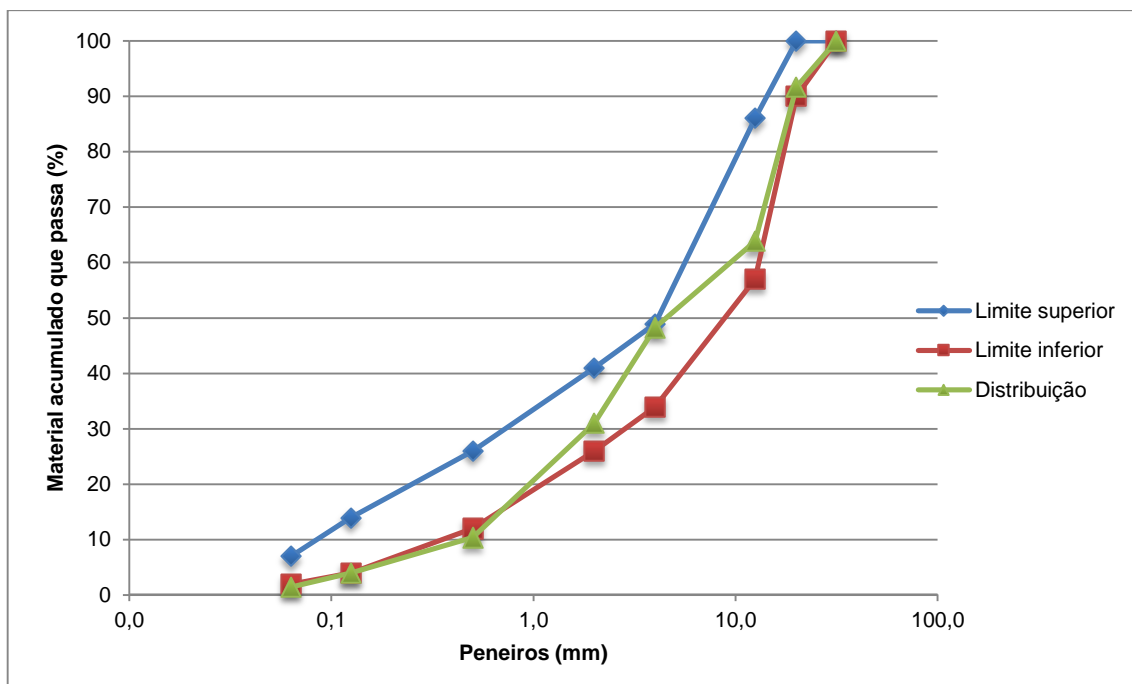
que se encontrasse em conformidade com o fuso granulométrico recomendado pela norma NP EN 13108-1 [39].

O Quadro 3.3 e a Figura 3.2 apresenta a composição granulométrica da mistura estudada, e o respetivo fuso granulométrico preconizado na norma NP EN 13108-1 [39].

**Quadro 3.3 - Composição granulométrica da mistura de agregados e fuso granulométrico**

Abertura dos peneiros (mm)	% de passados		
	Curva Granulométrica da mistura em estudo	Fuso Granulométrico “EN 13108-1”	
		Limite Superior	Limite Inferior
31,5	100	100	100
20	92	100	90
12,5	64	86	57
4	48	49	34
2	31	41	26
0,5	10	26	12
0,125	4	14	4
0,063	1	7	2





**Figura 3.2 - Curva granulométrica da mistura de agregados**

Na análise granulométrica dos agregados utilizados na produção das misturas betuminosas foram seguidos os pressupostos definidos na norma NP EN 933-1 [42].

Todo o material com dimensão inferior a 4 mm foi separado com recurso a um conjunto de peneiros da marca *Impact* e um agitador eletromagnético da marca *Matest*, modelo *A059- 12*, propriedade do LVCT do IST, como se pode observar na Figura 3.3.



**Figura 3.3 - Conjuntos de peneiros e agitador eletromagnético**

Todo o material granular, que constituía a mistura betuminosa, foi separado por peneiração e agrupado por frações granulométricas, como se pode observar na Figura 3.4.



**Figura 3.4 - Agregados separados pelas várias frações**

A separação dos agregados em várias frações foi executado com recurso a uma série de peneiros da marcação CE, definida na norma NP EN 131108-1 [39], dispostos por ordem decrescente das dimensões das malhas dos peneiros.

O método consiste na peneiração dos agregados secos. No caso dos agregados com dimensões inferiores a 4 mm, aplicou-se a peneiração mecânica durante 20 minutos por cada amostra de agregados. Este tipo de peneiração é bastante eficaz, contudo existem algumas considerações a ter em conta, nomeadamente o tempo de peneiração e o carregamento sobre os peneiros, de forma a evitar a sobrecarga dos mesmos.

Os agregados com dimensões superiores a 4 mm foram submetidos a uma agitação manual, com o mesmo intuito, separação do material em várias frações.

### **3.2.2 Ligante betuminoso**

Como referido anteriormente, na presente dissertação foram utilizados dois betumes de pavimentação (B 35/50 e BT 35/50), fornecidos pela Cepsa. Estes encontram-se em conformidade com as exigências da norma EN 12591 [43] (Anexo C) e apresentam a correspondente marcação CE.

A Cepsa têm vindo a desenvolver uma ampla e completa gama de betumes temperados, na qual se inclui o ligante utilizado no programa experimental da presente dissertação. Este tipo de betume tradicional BT (baixa temperatura) apresenta todas as propriedades reológicas idênticas às do betume tradicional 35/50, no entanto as temperaturas de fabrico e compactação e de manuseio são inferiores, tal como se pode observar no Quadro 3.4. A principal aplicação deste tipo de ligante é a produção de misturas betuminosas temperadas, cujo fabrico e espalhamento são exatamente iguais aos das misturas convencionais reduzindo, contudo, a temperatura de aquecimento dos agregados até 40°C.

**Quadro 3.4 - Temperaturas orientativas recomendadas pelo fabricante para utilização do betume BT 35/50 e do betume 35/50**

Temperaturas	Betume BT 35/50	Betume 35/50
Ligante	155°C – 160°C	160°C – 165°C
Fabrico	≥ 125°C	162°C – 166°C
Compactação	≥ 120°C	152°C – 156°C

### Viscosidade dinâmica

No sentido de melhor conhecer o comportamento dos diferentes tipos de betumes de pavimentação, com e sem incorporação de aditivo, a diferentes temperaturas, determinou-se a viscosidade dinâmica com base no ensaio de viscosidade dinâmica do betume, de acordo com a norma EN 13302 [44].

A viscosidade dinâmica é uma propriedade altamente dependente da temperatura, desta forma no decorrer do ensaio foi utilizado uma sonda de penetração da *Testo* modelo 905-T1, propriedade do LVCT do IST, representado na Figura 3.5, para registar com rigor a temperatura a que o ligante se encontrava no decorrer do ensaio.



**Figura 3.5 - Sonda de penetração [45]**

Este ensaio tem por objetivo a determinação da viscosidade dinâmica do betume, através da medição do esforço de torção, necessário para manter uma determinada velocidade de rotação constante, com recurso a um viscosímetro rotacional da *SELECTA* modelo *ST-2020-R*, propriedade do LCVT do IST, como se encontra na Figura 3.6.



**Figura 3.6 - Viscosímetro Rotacional**

A preparação da amostra do ligante betuminoso é realizada segundo a norma EN 12594 [46]. As amostras de betume puro foram recolhidas para latas metálicas de cinco litros para garantir o mesmo lote em todos os ensaios, tanto para o betume puro como para o betume temperado 35/50.

O ensaio é realizado sobre amostras de 800 g de ligante, previamente aquecidas na estufa ventilada, controlada termostaticamente, a uma temperatura até 80°C acima do ponto de amolecimento expectável ou, no máximo 200°C, dependendo da temperatura que for menor. Com recurso a uma vareta procede-se à homogeneização manual da amostra, evitando a formação de bolhas, durante três minutos.

Previamente, o recipiente de amostra vazia e a haste devem ser colocados no interior de um meio termostaticado à temperatura do ensaio. Posteriormente, coloca-se o recipiente que contém a amostra de betume na unidade de aquecimento e imerge-se a haste, previamente aquecida, no recipiente da amostra, onde permanece até estabilizar durante 15 a 30 minutos, como representa a Figura 3.7. Para que a estabilização ocorra mais depressa pode deixar-se a haste a rodar a uma taxa de corte reduzida.

Após o período de estabilização, selecciona-se a velocidade de rotação a aplicar à haste, em rotações por minuto (rpm), e cerca de  $60 \pm 5$  s após o início do ensaio realizam-se as leituras do valor da viscosidade dinâmica em centipoise (cP).

A seleção da haste utilizada neste ensaio tem um papel preponderante nas leituras das medições, que devem ser efetuadas num intervalo de binário entre 20% e 90% de trabalho indicado pelo aparelho. Caso este intervalo não seja cumprido deve-se mudar a haste ou a velocidade de rotação.



**Figura 3.7 - Esquema do Viscosímetro Rotacional**

Para caracterização do betume, a viscosidade dinâmica foi determinada para as mesmas temperaturas que as temperaturas de fabrico da mistura betuminosa. No Quadro 3.5 encontram-se, de forma resumida, os diferentes tipos de betumes de pavimentação e as temperaturas de ensaio para a determinação da viscosidade dinâmica. As velocidades de rotação aplicadas foram variáveis consoante a temperatura e o tipo de aditivo.

**Quadro 3.5 - Temperaturas do ensaio para a determinação da viscosidade dinâmica**

Betume / Aditivo		Temperaturas de ensaio (°C)		
<b>B 35/50</b>	120	135	165	
<b>Betume Temperado 35/50</b>	120	135	165	
<b>Betume 35/50 + 4%RheoFalt</b>	120	135	165	
<b>Betume 35/50 + 4%Sasobit</b>	120	135	165	
<b>Betume 35/50 + 2%Rediset</b>	120	135	165	

No presente estudo selecionou-se a haste R2. No Quadro 3.6 encontram-se os intervalos de funcionamento para este tipo de haste. Estes valores contribuem para a seleção adequada do tipo de haste, que varia consoante a temperatura e a velocidade de rotação [47].

Com o aumento da temperatura, o ligante betuminoso torna-se mais fluído, portanto é necessário aumentar o diâmetro da haste, ou aumentar a velocidade de rotação, de forma a assegurar uma percentagem de esforço superior a 20%. Por outro lado, quando o betume apresenta uma viscosidade, elevada deve ser aplicada uma baixa velocidade de rotação, para que não seja ultrapassado os 90% de esforço. Os valores de viscosidade dinâmica foram determinados para percentagens de esforço entre 20% e 90%. Desta forma, deve ter-se em consideração estes efeitos na determinação da viscosidade dinâmica, para qualquer combinação velocidade/haste [47].

**Quadro 3.6 - Intervalos de funcionamento para a haste R2 [47]**

Velocidade (rpm)	Haste R2
	Viscosidade (cP)
6	6 667
10	4 000
12	3 333
20	2 000
30	1 333
50	800
60	667
100	400

### 3.3 Produção de misturas betuminosas

A produção das misturas betuminosas segue os procedimentos estipulados na norma EN 12697-35 [48]. As temperaturas alvo de fabrico e compactação das misturas betuminosas para a realização dos provetes encontram-se resumidas no Quadro 3.7.

**Quadro 3.7 - Temperaturas de fabrico e compactação**

Mistura / Aditivo	Temperaturas Alvo (°C)	
	Fabrico	Compactação
<b>M1</b> <b>(Sasobit)</b>		100
	120	120
	165	120
<b>M2</b> <b>(Rediset)</b>		100
	120	120
	165	120
<b>M3</b> <b>(BT 35/50)</b>		100
	120	120
	135	120
	165	120
<b>M4</b> <b>(RheoFalt)</b>		100
	120	120
	165	120

Para a preparação das misturas betuminosas pesam-se, primeiramente, as diversas frações dos diferentes agregados, correspondentes à composição da mistura betuminosa, calculadas inicialmente para a massa de cada provete, assim como os aditivos (Sasobit, Rheofalt ou Rediset).

Posteriormente colocam-se os agregados na estufa de aquecimento ventilada, à temperatura de produção alvo, durante um período mínimo de 8 horas, juntamente como o ligante betuminoso, este com um tempo de condicionamento inferior ao dos agregados, de cerca  $2,5 \pm 0,5$  horas. De seguida, procede-se ao envolvimento completo dos agregados com o ligante betuminoso, e posteriormente com o aditivo, com recurso a um misturadora automática da marca *Controls*, modelo *76-B0077/B*, propriedade do LVCT do IST, previamente aquecida à temperatura de produção da mistura, durante um período aproximado de 3 minutos (Figura 3.8).



**Figura 3.8 - Misturadora utilizada para a produção de misturas betuminosas**

Com o objetivo de garantir a temperatura alvo foi utilizada uma sonda de penetração da *Testo* modelo 905-T1, que era introduzida na mistura após o seu fabrico, e um termómetro por raios infravermelhos da marca *TFA*, modelo *Flash III*, propriedade do LVCT do IST, como apresenta a Figura 3.9.



**Figura 3.9 - Termómetro por infravermelhos**

### **3.4 Baridade máxima teórica**

Para a determinação da baridade máxima teórica,  $\rho_{mv}$ , foram seguidos os procedimentos preconizados na norma EN 12697-5 [49], segundo o procedimento A – procedimento volumétrico.

Esta norma destina-se a uma amostra solta de misturas betuminosas, com incorporação de betumes de pavimentação, betumes modificados ou outros ligantes betuminosos, utilizados na produção de misturas a quente, ou temperadas.



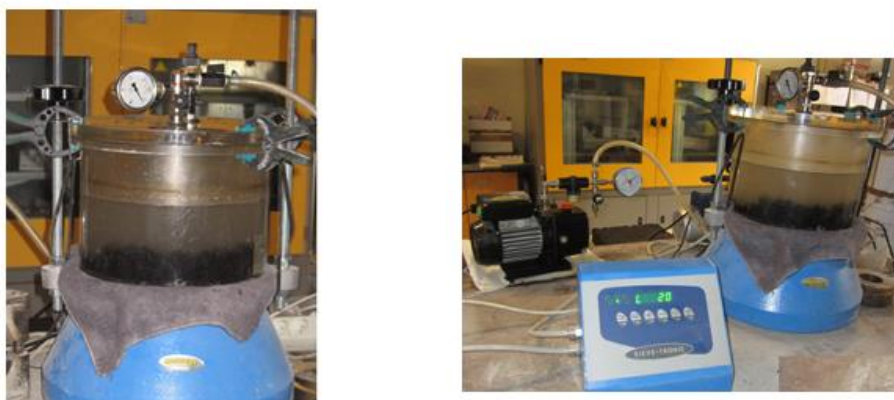
A quantidade de amostra deve ser no mínimo de 1000 g para, no presente estudo, um  $D_{\text{máx}}$  de 20 mm. Desta forma optou-se por uma quantidade de massa de mistura de 1100 g. Na Figura 3.10 pode observar-se uma amostra de mistura betuminosa solta para determinação da baridade máxima teórica.



**Figura 3.10 - Amostra de mistura betuminosa solta para o ensaio de baridade máxima teórica**

A baridade máxima teórica é utilizada no cálculo da porosidade, em conjunto com a baridade das misturas betuminosas compactadas.

Para a realização deste ensaio foi utilizado um picnómetro de vácuo da marca *Matest*, modelo *B067N* e um agitador eletromagnético da marca *Matest*, modelo *A059-12*, propriedade do LVCT do IST, conforme se observa na Figura 3.11.



**Figura 3.11 - Picnómetro de vácuo com agitador eletromagnético**

De acordo com a norma EN 12697-5 [49], começa-se por determinar a massa do picnómetro vazio ( $m_1$ ). De seguida, determina-se a massa do picnómetro de vácuo com a amostra seca no seu interior ( $m_2$ ). Posteriormente encheu-se o picnómetro com água até, aproximadamente, 30 mm abaixo do encaixe da tampa. De seguida, aplica-se um vácuo parcial com uma pressão residual de 4 kPa, durante  $15 \pm 1$  minutos. Com recurso a vibração mecânica o ar é retirado do interior do picnómetro.

Após a retirada do ar, enche-se novamente o picnómetro com água, com cuidado, para não haver introdução de ar, pesa-se de novo todo o conjunto ( $m_3$ ) e regista-se a temperatura da água, com recurso a um termómetro.

A baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa,  $\rho_{mv}$ , segundo o método volumétrico, é determinada pela Equação 3.1.

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times \left( V_p - \frac{(m_3 - m_2)}{\rho_w} \right)} \quad 3.1$$

Onde:

$\rho_{mv}$  - baridade máxima teórica da mistura, de acordo com o método volumétrico (kg/m<sup>3</sup>);

$m_1$  - massa do picnómetro mais acessórios (g);

$m_2$  - massa do picnómetro mais acessórios, amostra seca (g);

$m_3$  - massa do picnómetro mais acessórios, amostra seca e água (g);

$V_p$  - volume do picnómetro, cheio de água até à marca de referência (m<sup>3</sup>);

$\rho_w$  - massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m<sup>3</sup>).

## 3.5 Compactação

### 3.5.1 Compactação de provetes prismáticos

A compactação das lajes em laboratório é realizada segundo a Norma EN 12697-33 [50], com recurso a um compactador de rolo metálico da marca *Controls*, modelo 77-B3602 (Figura 3.12) propriedade do LVCT do IST.



Figura 3.12 – Compactador de rolo (*Roller Compactor*)

As misturas betuminosas M3 (BT35/50) e M4 (RheoFalt) foram produzidas em laboratório de acordo com a norma EN 12697-35 [48], e estabilizadas à temperatura de compactação, juntamente com o molde metálico.

O compactador de rolo impõe uma espessura exata pré-definida, desta forma é possível compactar as misturas betuminosas garantindo uma baridade alvo. Previamente à produção da mistura betuminosa é fundamental saber a quantidade de massa necessária para produzir um provete prismático com as dimensões pretendidas de 300 × 400 × 60 mm.

Posteriormente, a mistura foi colocada no molde metálico, em ordem à sua compactação, como se pode observar na Figura 3.13.



**Figura 3.13 - Molde com mistura betuminosa a compactar**

O processo de compactação com recurso ao *roller compactor* consiste na aplicação de uma ação vertical, mediante uma série de passagens a uma velocidade constante por um rolo de aço liso, diretamente sobre um filme que cobre a mistura betuminosa. A compactação é feita num movimento suave e contínuo. O objetivo da compactação é a obtenção de uma porosidade alvo, desta forma o número de passagens de carga vai aumentando até alcançar a carga principal, de modo a atingir a espessura desejada para a laje.

Após a compactação estar finalizada é importante deixar arrefecer a laje à temperatura ambiente para iniciar o desmolde do provete que é efetuada através da desmontagem das paredes laterais do molde que encontram-se fixas por parafusos (Figura 3.14).

Para cada mistura betuminosa analisada foram fabricadas duas lajes para serem ensaiadas à deformação permanente, conforme estipulado na norma EN 12697-22 [38]. Desta forma no presente estudo foram fabricadas 14 lajes.



Figura 3.14 - Laje compactada

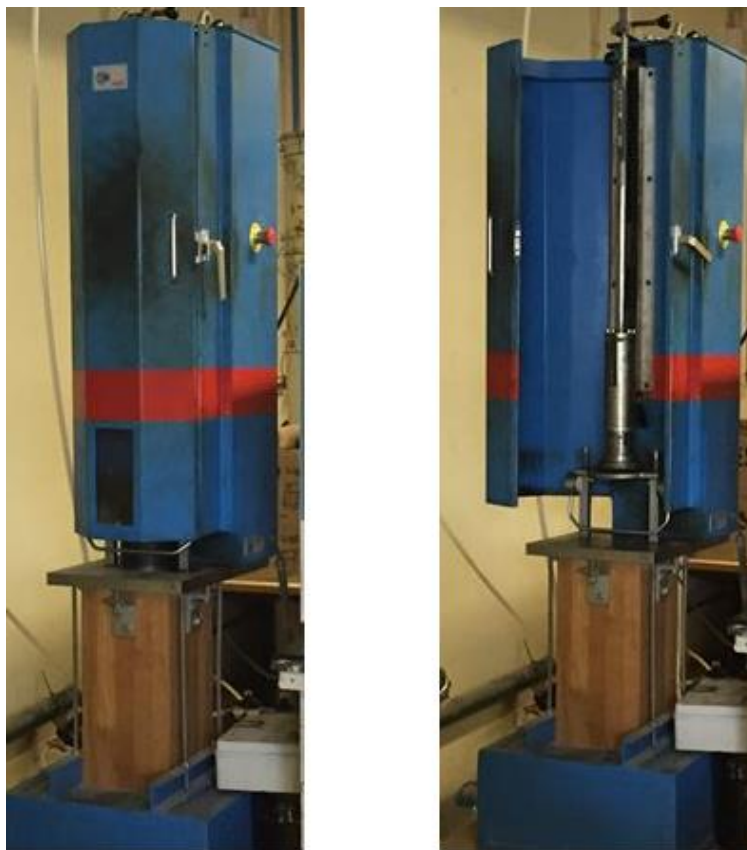
### 3.5.2 Compactação de provetes cilíndricos

Após a produção da mistura betuminosa de acordo com a norma EN 12697-35 [48], esta foi colocada na estufa até atingir a temperatura de compactação.

De acordo com a norma EN 12697-30 [51] os provetes cilíndricos devem apresentar um diâmetro de  $101,6 \pm 0,1$  mm e altura de  $63,5 \pm 2,5$  mm. A dimensão máxima do inerte da mistura não deve ser superior a 22,4 mm.

Os provetes cilíndricos são compactados com recurso a um compactador de impacto da marca *Proeti*, modelo *B0041* (Figura 3.15), propriedade do LVCT do IST, de acordo com a norma EN 12697-30 [51]. O procedimento consiste em compactar, por impacto, uma amostra de mistura betuminosa solta num molde, com diâmetro interior de  $101,6 \pm 0,1$  mm, através da queda de uma massa deslizante com  $4550 \pm 20$  g, a uma altura fixa de  $460 \pm 3$  mm num certo número de vezes, em cada face do provete. O processo de compactação não deve ultrapassar um período de 4 minutos. Os moldes dos provetes devem ser previamente aquecidos na estufa à temperatura de compactação, antes da colocação de uma quantidade pré-definida de mistura.

Os provetes cilíndricos foram compactados com a aplicação de 75 pancadas em cada face do provete, conforme descrito no Anexo Nacional da NP EN 13108-1 [39].



**Figura 3.15 - Compactador de impacto**

De seguida os provetes cilíndricos são deixados a arrefecer à temperatura ambiente, de forma a evitar o risco de deformação, como se pode observar na Figura 3.16. O tempo de cura de cada um dos provetes a ensaiar foi de cerca de 16 horas.



**Figura 3.16 - Provetes compactados**

Após o tempo de cura, retiraram-se os provetes dos moldes com recurso a um macaco hidráulico e registaram-se as suas dimensões de forma a verificar com o estipulado na norma EN 12697-30 [51]. A Figura 3.17 apresenta o aspeto final dos provetes cilíndricos.





**Figura 3.17 – Aspeto final dos provetes**

De seguida determinou-se a baridade aparente de cada um dos provetes compactados, de acordo com a norma NP EN 12697-6 [52].

### **3.6 Baridade aparente dos provetes compactados**

Na determinação da baridade aparente dos provetes prismáticos e cilíndricos foram seguidos os procedimentos preconizados na norma EN 12697-6 [52]. Para a realização deste ensaio foi utilizada uma balança da marca *Kern*, modelo 572-45, propriedade do LVCT do IST.

Para a determinação da baridade aparente das lajes ensaiadas à deformação permanente, posteriormente à realização do ensaio procedeu-se ao corte das lajes. No corte das lajes para obter provetes prismáticos foi utilizada uma serra de corte com disco diamantado. Cada laje ensaiada foi cortada em dois provetes prismáticos, evitando, desta forma, que os provetes contivessem a zona da laje deformada (Figura 3.18).



**Figura 3.18 – Provete prismáticos**

Na presente dissertação, a determinação da baridade aparente dos provetes prismáticos foi realizada segundo dois métodos. O primeiro procedimento foi realizado com base no método B – provete saturado com superfície seca. O segundo procedimento foi efetuado de acordo o método C – provete selado, ambos os métodos encontram-se descritos na norma EN 12697-6 [52].

O motivo pelo qual se realizou a determinação da baridade aparente segundo dois métodos deve-se ao facto dos resultados de baridade aparente, obtidos para os provetes prismáticos da mistura M3 com recurso ao procedimento B, apresentarem valores de porosidades muito baixos, devido a uma drenagem excessiva de água por parte dos provetes após retirada do banho. Assim, com o objetivo de reduzir o excesso de drenagem verificado nos provetes constituídos pela M3 (BT 35/50), procedeu-se à selagem dos mesmos, com recurso a parafina, de acordo com a aplicação do método C, obtendo-se, desta forma, resultados de porosidades expectáveis.

Nos provetes constituídos pela mistura M4 (RheoFalt) não se verificou excesso de drenagem, pelo que determinou-se a baridade aparente com recurso ao método B – provete saturado com superfície seca.

A determinação da baridade aparente dos provetes cilíndricos foi realizada segundo o método B – provete saturado com superfície seca, após o seu fabrico, como se observa na Figura 3.19.



Figura 3.19 - Provete cilíndricos

#### Método B: Baridade – provete saturado com a superfície seca

De acordo com o método B para determinação da baridade aparente, começa-se por determinar a massa do provete seco ( $m_1$ ). De seguida, determinou-se a massa volúmica da água à temperatura de ensaio ( $\rho_w$ ). Posteriormente mergulhou-se o provete no banho de água, até este se encontrar saturado, geralmente o período de saturação é de pelo menos 30 minutos. Após o período de saturação, determinou-se a massa do provete saturado quando imerso ( $m_2$ ), como representa a Figura 3.20. É importante evitar o aparecimento de bolhas à superfície do provete. Removeu-se o provete da água e secou-se a sua superfície com uma camurça húmida. Por fim determinou-se, através de pesagem ao ar, a massa do provete saturado com a superfície seca imediatamente após secagem ( $m_3$ ).

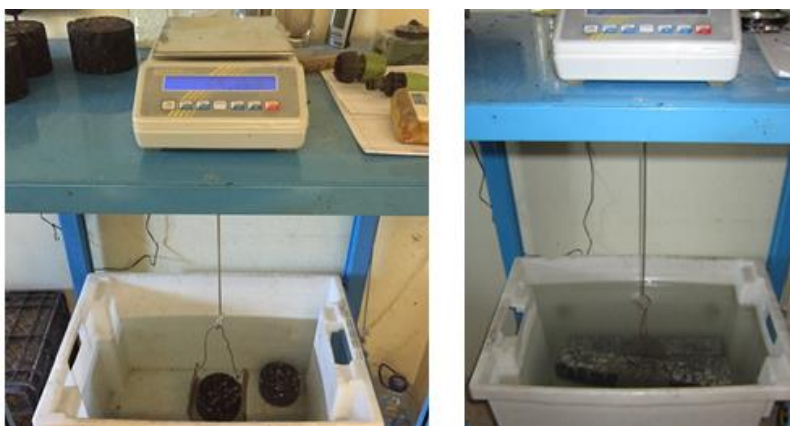


Figura 3.20 - Pesagem de provete cilíndrico imerso em água (esquerda) e pesagem de provete prismático imerso em água (direita)

Após a determinação das massas é possível o cálculo das baridades aparentes, segundo o procedimento B, pela Equação 3.2.

$$\rho_{b,ssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad 3.2$$



Onde:

$\rho_{b,ssd}$  – baridade de um provete saturado com superfície seca ( $\text{kg/m}^3$ );

$m_1$  – massa do provete seco (g);

$m_2$  – massa do provete em água (g);

$m_3$  – massa do provete saturado com a superfície seca (g);

$\rho_w$  – massa volúmica da água à temperatura de ensaio ( $\text{kg/m}^3$ ).

### **Método C: Baridade – provete selado**

A determinação da baridade aparente, de acordo com o método C – Provette selado, inicia-se com a pesagem do provete seco ( $m_1$ ). Determina-se a massa volúmica da água à temperatura de ensaio ( $\rho_w$ ). Posteriormente o provete é envolvido, cuidadosamente, numa película uniforme de parafina, para não formar bolhas de ar, como se pode observar na Figura 3.21, e é determinado o seu peso ( $m_2$ ). Na figura 3.22 pode observar-se o aspeto final do provete prismático selado. De seguida mergulha-se o provete no banho de água, evitando a formação de bolhas de água, e é registado o peso do provete selado imerso ( $m_3$ ).



**Figura 3.21 - Selagem do provete**



**Figura 3.22 - Provete selado**

De acordo com a metodologia C, o valor da baridade aparente é obtido segundo a Equação 3.3.

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\frac{m_2 - m_3}{\rho_w} - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}} \quad 3.3$$

Onde:

$\rho_{bsea}$  - baridade de um provete selado (kg/m<sup>3</sup>);

$m_1$  - massa do provete seco (g);

$m_2$  - massa do provete selado seco (g);

$m_3$  - massa do provete selado em água (g);

$\rho_w$  - massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_{sm}$  - massa volúmica do material selante à temperatura de ensaio (kg/m<sup>3</sup>).

### 3.7 Propriedades volumétricas dos provetes betuminosos

#### 3.7.1 Porosidade

De acordo com a norma EN 12697-8 [53], os valores da baridade máxima teórica e da baridade dos provetes compactados são utilizados no cálculo das restantes propriedades volumétricas dos provetes, como a porosidade ( $V_m$ ) e o volume de vazios na mistura de agregados (VMA). Desta forma, a porosidade é calculada através da Equação 3.4.

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_b}{\rho_{mv}} \times 100 \quad 3.4$$

Onde:

$V_m$  – porosidade (%);

$\rho_{mv}$  – baridade máxima teórica (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_b$  – baridade do provete compactado (kg/m<sup>3</sup>).

### 3.7.2 Volume de vazios na mistura de agregado

A determinação do volume de vazios na mistura de agregado (VMA) realizou-se de acordo com a norma EN 12607-8 [53], com base na Equação 3.5.

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_{b,ssd}}{\rho_B} \quad 3.5$$

Onde:

VMA – volume de vazios na mistura de agregado (%);

$V_m$  – porosidade (%);

B – conteúdo de ligante betuminoso da mistura (%);

$\rho_{b,ssd}$  – baridade de um provete saturado com superfície seca (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_B$  – baridade do ligante betuminoso (kg/m<sup>3</sup>).

## 3.8 Ensaio Marshall

Para garantir o bom desempenho das misturas M3 (BT 35/50) e M4 (RheoFalt), efetuou-se o ensaio de Marshall a diferentes temperaturas de fabrico e compactação, de forma a enquadrar as propriedades mecânicas e volumétricas com os requisitos estabelecidos no CETO [13].

No Quadro 3.8 apresentam-se os valores limite das propriedades que as MBQ devem apresentar quando se destinam a camadas de base, nomeadamente para a camada AC 20 base. Estes requisitos encontram-se especificados no CETO [13]. Contudo, ainda não existem requisitos aplicáveis às MBT, por ser uma técnica recente. Desta forma é fundamental a avaliação do comportamento das misturas betuminosas temperadas, no sentido de identificar possíveis melhorias nas composições e solucionar questões futuras que possam comprometer a vida útil do pavimento rodoviário. Pretende-se avaliar a influência das temperaturas de fabrico e compactação sobre o desempenho obtido pela mistura.

**Quadro 3.8 - Requisitos/Propriedades para as camadas do tipo AC 20 base [13]**

Requisitos/Propriedades		Ref. normativa	Unidade	Valores limites CETO - EP
Porosidade	V <sub>m</sub>	EN 12697-8	%	3 / 6
Vazios na mistura de agregados	VM <sub>Amin</sub>	EN 12697-8	%	> 14
Marshall	Estabilidade	S <sub>min/max</sub>	kN	7,5 / 15
	Deformação	F <sub>min/max</sub>	mm	2 / 4
	Quociente	Q <sub>min</sub>	kN/mm	> 2

Para a realização do ensaio Marshall foram seguidos os procedimentos descritos na norma EN 12697-34 [54]. Desta forma foram fabricados conjuntos de 3 provetes para as diferentes temperaturas de fabrico e compactação de cada uma das misturas M3 e M4, como se pode observar na Figura 3.23. O estudo sugere a realização de apenas 3 provetes para cada mistura por ser suficientemente representativo do seu desempenho e imprescindível para uma análise comparativa. Os provetes a ensaiar foram fabricados segundo os procedimentos descritos na norma EN 12697-35 [48] e compactados de acordo com a norma EN 12697-30 [51].



**Figura 3.23 - Provetes antes do ensaio de compressão Marshall**

Após a produção da mistura, parte desta é compactada e a restante deixada na forma solta. Sobre os provetes cilíndricos é determinada a baridade aparente ( $\rho_{b,ssd}$ ), de acordo com a norma EN 12697-6

[52], e sobre a parte da mistura betuminosa solta determina-se a baridade máxima teórica ( $\rho_{mv}$ ), segundo a norma EN 12697-5 [49]. Com os valores da baridade máxima teórica e da baridade aparente dos provetes compactados é possível determinar as propriedades volumétricas dos provetes de acordo com a norma EN 12697-8 [53], nomeadamente a porosidade ( $V_m$ ) e o volume de vazios na mistura de agregado (VMA).

No ensaio de compressão de Marshall são determinadas as características de Marshall de estabilidade (S) e de deformação (F) decorrentes da força aplicada e da deformação sofrida por um provete em condições normalizadas estipuladas na norma EN 12697-34 [54]. O ensaio foi realizado após um período de 4 a 32 horas após a desmoldagem dos provetes cilíndricos.

Previamente à realização do ensaio, submeteram-se os provetes a um banho termoestático a  $60\pm 1^\circ\text{C}$ , durante intervalo de tempo entre 40 a 60 minutos. O estabilómetro foi pré-aquecido no banho, durante um período de 30 minutos, à temperatura de ensaio (Figura 3.24). Esta ação foi realizada no início de cada ensaio sobre um lote, não superior a 12 provetes.



**Figura 3.24 - Banho termoestático com o estabilómetro e os provetes a ensaiar**

Posteriormente, retirou-se o provete do banho termoestático e este foi colocado no estabilómetro, centrado transversalmente, de forma a garantir bom contacto entre as superfícies do provete e do estabilómetro. De seguida, colocou-se o conjunto (estabilómetro e provete) centrado na prensa de ensaio (Figura 3.25).



**Figura 3.25 - Provete submetido ao ensaio de compressão Marshall**

A carga é aplicada ao provete de forma a atingir uma velocidade de deformação constante de  $50 \pm 2$  mm/minuto, de modo a atingir o valor máximo no momento da rotura. Esta fase do ensaio foi realizada num período máximo de 40 segundos, após a remoção do provete do banho de água. Por fim, registaram-se os valores de estabilidade e deformação. Na Figura 3.26 observa-se o aspeto dos provetes após o ensaio de Marshall.



**Figura 3.26 - Provetes após o ensaio de Marshall**

A carga máxima atingida representa a estabilidade da mistura betuminosa referente, apenas, aos casos em que a altura do provete seja igual a 63,5 mm. Para alturas diferentes, porém dentro do intervalo admitido,  $63,5 \pm 3,5$  mm, o valor da estabilidade resultante do ensaio deve ser multiplicado pelo fator de correção, conforme a Equação 3.6.

$$S = c \times S^* \quad 3.6$$

Onde:

$S$  – estabilidade do provete;

$S^*$  – estabilidade antes da correção;

$c$  – fator de correção em função da altura do provete, calculado a partir da Equação 3.7.

$$c = 5,2 \times e^{-0,0259 \times h} \quad 3.7$$

Onde:

$h$  – altura do provete (mm);

### 3.9 Caracterização do desempenho das misturas betuminosas

#### 3.9.1 Ensaio de deformação permanente

O ensaio de resistência à deformação, usualmente designado por ensaio de pista (*Wheel Tracking Test*) permite avaliar a suscetibilidade dos materiais betuminosos à deformação, pela medição da profundidade de rodeira formada após repetidas passagens de uma roda carregada sobre uma laje, submetido a temperaturas elevadas.

Na determinação da resistência à deformação permanente foram seguidos os procedimentos de ensaio definidos na norma EN 12697-22 [38]. O ensaio foi realizado segundo o Procedimento B, com recurso ao equipamento *Wheel Tracking*, da marca *Controls*, modelo *77-B3502*, do tipo pequeno (*Small Size Device*) e com acondicionamento de ar, propriedade do LVCT do IST, como representado na Figura 3.27.





**Figura 3.27 - Equipamento do ensaio de resistência à deformação permanente (*Whell Tracking*)**

De acordo com a norma, a utilização deste equipamento requer o ensaio de dois provetes prismáticos, desta forma o ensaio foi realizado em séries de duas lajes de dimensões de 400x300x60 mm.

O ensaio foi realizado em provetes com no mínimo 2 dias de idade desde a compactação. As lajes foram armazenadas numa superfície horizontal a temperaturas até 25°C.

Previamente à realização do ensaio, todas as lajes foram pesadas, e medidas as suas espessuras em quatro pontos. De seguida determinou-se as baridades geométricas de cada provete prismático, de acordo com a norma EN 12697-6 [52], segundo o procedimento D - geométrico, Equação 3.8.

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{h \times l \times w} \times 10^6 \quad 3.8$$

Onde:

$\rho_{b,dim}$  - baridade do provete segundo o método geométrico (kg/m<sup>3</sup>);

$m_1$  – massa provete seco (g);

$h$  – altura do provete (mm);

$l$  – comprimento do provete (mm);

$w$  – largura do provete (mm).

Realizou-se um furo em cada laje, para introdução de uma sonda de temperatura da máquina, quando colocada a amostra no seu interior, como representa a Figura 3.28.





**Figura 3.28 - Sonda de temperatura incorporada no equipamento do ensaio de pista**

Antes do início do ensaio, condicionou-se as amostras a ensaiar à temperatura de ensaio, aproximadamente 60°C, durante um período de 4 h e pré aqueceu-se o equipamento *Wheel Tracking* à mesma temperatura de ensaio, de acordo com a norma EN 12697-22 [38]. Após o período de condicionamento iniciou-se o ensaio.

A realização do presente ensaio consiste na aplicação de 10 000 ciclos de carga, induzidos pela passagem sucessiva de uma roda sobre o provete. O ensaio dá-se por terminado quando este atinge os 10 000 ciclos de carga, ou quando é atingida a profundidade de rodeira de 20mm.

O equipamento realiza leituras dos deslocamentos verticais em cada 250 ciclos de carga.

Em cada ensaio são possíveis de serem analisados os seguintes resultados: a taxa de deformação média medida no ensaio de pista ao ar ( $WTS_{AIR}$ ) obtido segundo a Equação 3.9, a percentagem da profundidade média de rodeira dos dois provetes ensaiados ( $PRD_{AIR}$ ), e a média da profundidade de rodeira atingida no fim do ensaio ( $RD_{AIR}$ ).

$$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10\,000} - d_{5\,000})}{5} \quad 3.9$$

Onde:

- $WTS_{AIR}$  – taxa de deformação (mm/10<sup>3</sup> ciclos de carga);
- $d_{10\,000}$  – profundidade de rodeira após 10 000 ciclos (mm);
- $d_{5\,000}$  – profundidade de rodeira após 5 000 ciclos (mm).

A Figura 3.29 apresenta os provetes após a realização do ensaio.



**Figura 3.29 - Lajes ensaiadas à deformação permanente**

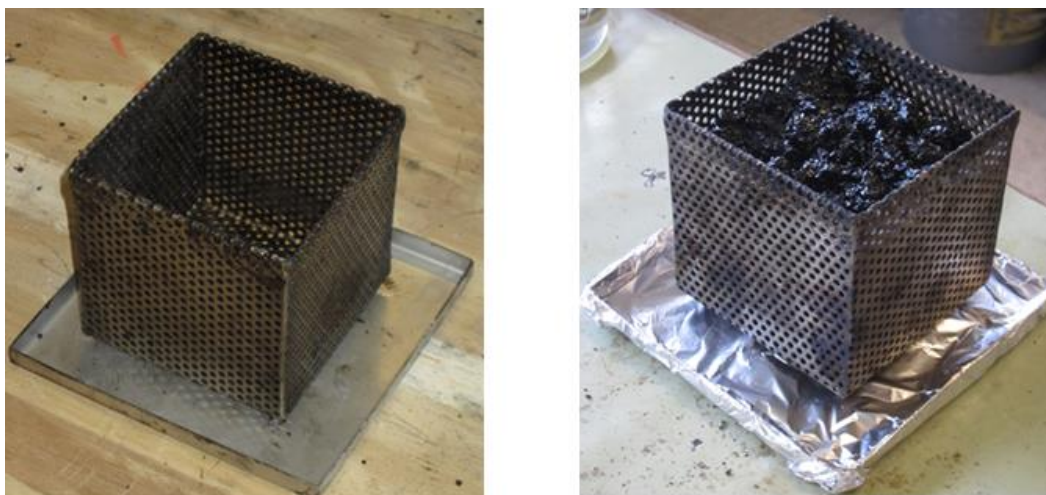
### **3.9.2 Ensaio de escorrimento**

A avaliação do escorrimento do ligante é realizada com base na norma EN 12697-18 [40]. O ensaio de escorrimento traduz o comportamento ao escorrimento de ligante por parte das misturas betuminosas temperadas, principalmente em situação de transporte e compactação, pois poderá conduzir a heterogeneidades nas camadas espalhadas, contribuindo para diferentes porosidades e degradações precoces.

#### **Método do Cesto (*Basket method*)**

Para a realização do ensaio de escorrimento, segundo o método do cesto definido pela norma EN 12697-18 [40], foi necessário o fabrico de uma mistura betuminosa de acordo com a norma EN 12697-35 [48], descrita anteriormente. Foram fabricados três lotes de mistura, sendo cada lote de mistura constituído por 1100 g de agregados, aos quais foram adicionados as respetivas proporções de ligante betuminoso e aditivo. O primeiro lote de cada mistura foi descartado, tendo sido apenas produzido para efeitos de controlo. Os restantes dois lotes de mistura não compactada foram, de seguida, recolhidos para o interior de dois cestos cúbicos metálicos (*drainage baskets*), de rede metálica perfuradas com aberturas circulares com 3,15 mm de diâmetro, permitindo assim o escorrimento do ligante betuminoso.

Cada cesto apresenta na sua base um tabuleiro revestido por uma folha de alumínio, onde se deposita o material escorrido, como se observa na Figura 3.30.



**Figura 3.30 - Conjunto cesto e tabuleiro (esquerda) e conjunto cesto, tabuleiro e mistura betuminosa (direita)**

Para a execução do ensaio de escorrimento utilizou-se o equipamento (cesto e tabuleiro) da marca *Controls*, modelo 75-B0019/B, propriedade do LVCT do IST.

O conjunto de cesto, tabuleiro e mistura betuminosa são colocados numa estufa à temperatura de ensaio, no caso de betumes modificados, esta temperatura de ensaio é igual à temperatura de fabrico acrescida de 15°C, durante um período de 3 horas  $\pm$  15 minutos.

O resultado do ensaio de escorrimento do ligante betuminoso numa mistura betuminosa corresponde à quantidade de material depositado no tabuleiro no final do ensaio e é obtido através da Equação 3.10.

$$D = 100 \times \frac{(W_2 - W_1)}{(1100 + B)} \quad 3.10$$

Onde:

$D$  – percentagem de material escorrido para o tabuleiro (%);

$W_1$  – massa inicial do tabuleiro revestido com papel de alumínio (g);

$W_2$  – massa final do tabuleiro revestido com papel de alumínio com material escorrido (g);

$B$  – massa inicial de betume na mistura betuminosa (g).

### 3.9.3 Ensaio de sensibilidade à água

Na presença de água, algumas misturas betuminosas apresentam uma redução substancial da resistência ao longo dos anos. A diminuição da resistência deve-se à degradação da colagem do ligante ao agregado.

O ensaio de sensibilidade à água realiza-se segundo a norma 12697-12 [37]. De acordo com a presente norma, são preparados conjuntos de 6 provetes cilíndricos para cada uma das quatro misturas a ensaiar. Estes devem apresentar um diâmetro de  $100 \pm 3$  mm e uma altura de 63,5 mm.

Após o fabrico e compactação dos provetes cilíndricos determinam-se as respectivas baridades e registam-se as suas dimensões, de forma a constituir dois subconjuntos de 3 provetes com alturas que não devem diferir mais de 5 mm e baridades mais de  $15 \text{ kg/m}^3$ . Os subconjuntos designaram-se como “húmidos” e “secos”, consoante o tipo de acondicionamento.

O primeiro subconjunto de provetes denominado por “húmidos” foi submetido ao acondicionamento em vácuo. Este método passa por colocar os provetes num apoio perfurado dentro do picnómetro de vácuo preenchido com água, a uma temperatura de  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , até pelo menos 20 mm acima do topo dos provetes, tal como se pode observar na Figura 3.31.



Figura 3.31 – Provetes cilíndricos no picnómetro

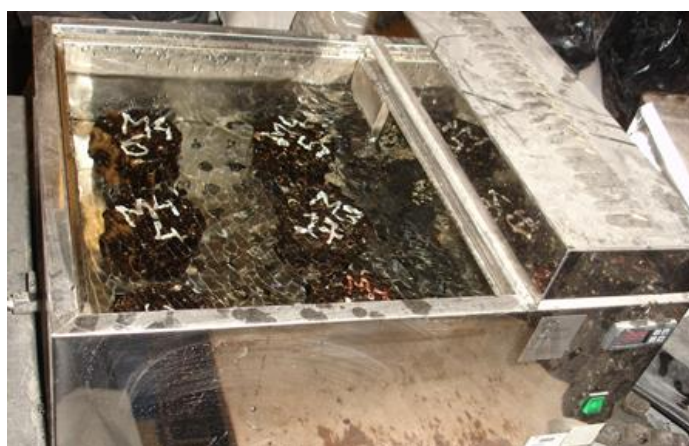
De seguida foi aplicado vácuo, de forma a obter uma pressão absoluta de  $6,7 \pm 0,3 \text{ kPa}$ , durante um período de  $10 \pm 1$  minutos (Figura 3.32). O vácuo foi mantido durante  $30 \pm 5$  minutos, posteriormente deixou-se entrar lentamente a pressão atmosférica no picnómetro e deixaram-se os provetes submersos em água durante mais  $30 \pm 5$  minutos.





**Figura 3.32 - Provetes submetidos a vácuo**

Após a aplicação de vácuo, determinaram-se as dimensões dos provetes “húmidos”, de forma a calcular o seu volume e verificar se houve variação deste. Os provetes cujo volume inicial aumentou mais de 2%, foram rejeitados. Posteriormente, este subconjunto de provetes “húmidos” foram acondicionados num banho de água a  $40 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante um período de 68 a 72 horas, como se pode observar na Figura 3.33.



**Figura 3.33 - Banho de água com provetes submersos**

Relativamente ao subconjunto de provetes “secos”, estes foram armazenados sobre uma superfície plana, a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , Figura 3.34.



**Figura 3.34 - Câmara de temperatura controlada**

Previamente à realização do ensaio de sensibilidade à água, ambos os subconjuntos (“húmidos” e “secos”) foram submetidos a uma temperatura de  $15 \pm 2^\circ\text{C}$ , durante um período 2 horas, como se observa na Figura 3.35. Posteriormente, todos os provetes são submetidos ao ensaio de tração indireta, com recurso a uma prensa da marca *Controls*, modelo 70-T0108/E, propriedade do LVCT do IST, de acordo com a norma EN 12697-23 [55].



**Figura 3.35 - Provetes acondicionados à temperatura de ensaio**

Os provetes foram colocados na prensa Marshall, no meio de duas barras de carga (Figura 3.36). De seguida iniciou-se a compressão, através da aplicação de uma carga diametral, a uma velocidade de deformação igual a  $50 \pm 2$  mm/min, após um período de transição inferior a 20% do tempo de carregamento, até a carga de pico,  $P$ , fosse atingido (Figura 3.37). A compressão continuou até haver rotura do provete, registou-se o tipo de rotura, e o estado dos agregados à superfície, de acordo com a norma EN 12697-23 [55].

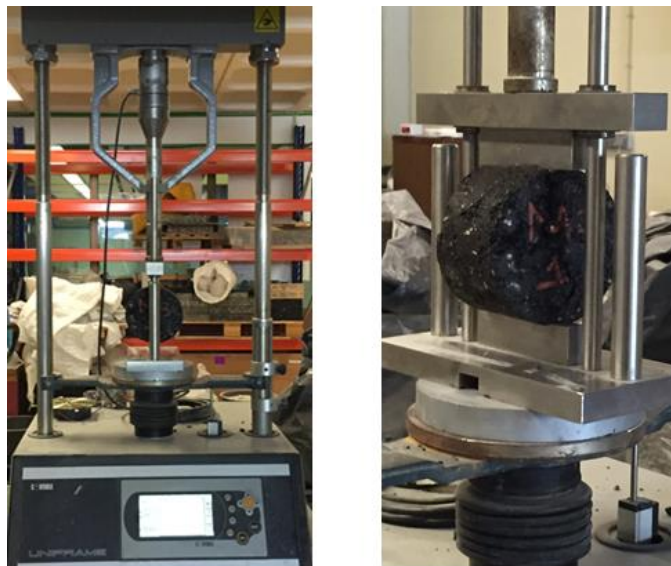


Figura 3.36 - Ensaio de tração indireta

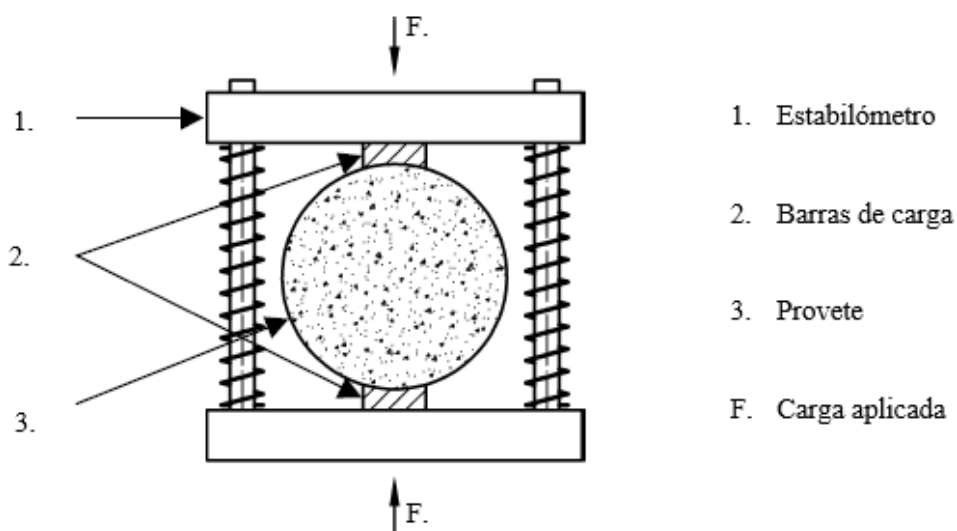


Figura 3.37 - Esquema do ensaio de tração indireta [55]

Os diversos tipos de rotura apresentam-se na Figura 3.38, e são caracterizados da seguinte forma:

- a) “Rotura clara” – Provete claramente quebrado, ao longo de uma linha diametral, exceto, pequenas seções triangulares próximas da zona de carregamento;
- b) “Deformação” – provete sem uma linha de quebra visível;
- c) “Combinação” – provete com uma linha de quebra limitada e com grandes áreas deformadas próximas da zona de carregamento.



**Figura 3.38 - Tipos de rotura**

Para cada provete ensaiado, a resistência à tração indireta, ITS, é calculada de acordo a norma EN 12697-23 [55], segundo a Equação 3.11.

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times H} \quad 3.11$$

Onde:

*ITS* – resistência à tração indireta (kPa);

*P* – carga de pico (kN);

*D* – diâmetro do provete (mm);

*H* – altura do provete (mm).

A resistência conservada em tração indireta (ITSR) calculou-se de acordo com a norma EN 12697-12 [37], segundo a Equação 3.12.

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad 3.12$$

Onde:

*ITSR* – resistência conservada em tração indireta (%);

*ITS<sub>w</sub>* – média da resistência à tração indireta do subconjunto “húmido” (kPa);

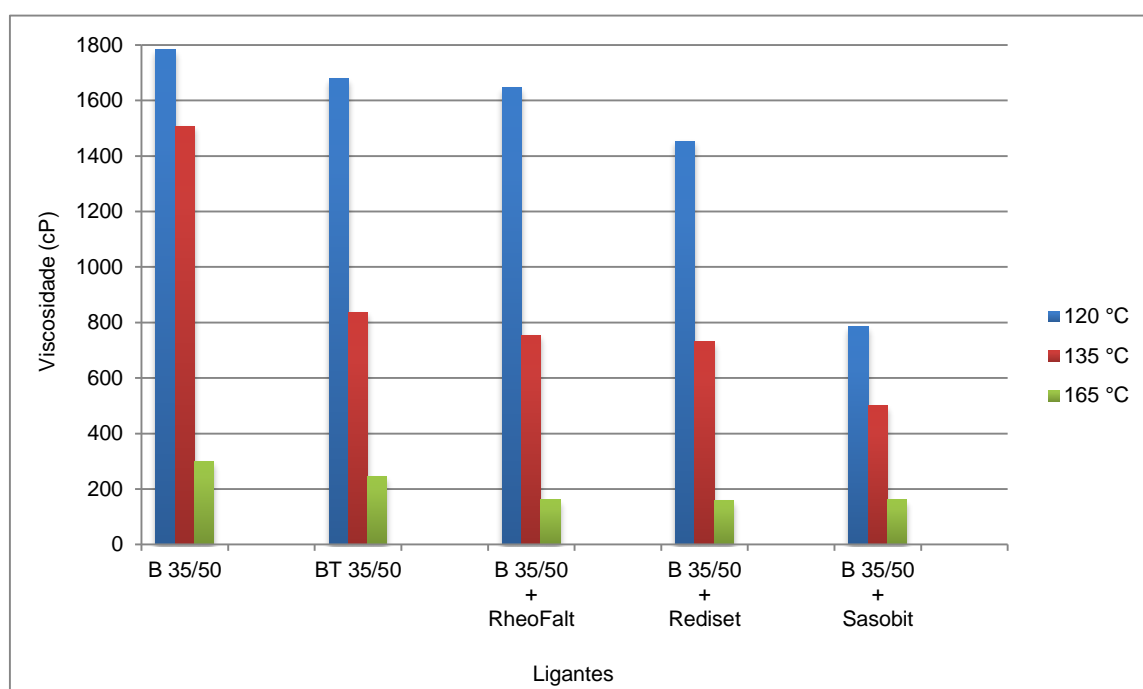
*ITS<sub>d</sub>* – média da resistência à tração indireta do subconjunto “seco” (kPa).



## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1 Viscosidade dinâmica do ligante

De forma a avaliar as propriedades dos ligantes a altas temperaturas (120°C, 135°C e 165°C) foi determinada a viscosidade dinâmica com recurso ao viscosímetro rotacional, com base na norma EN 13302 [44]. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.1.



**Figura 4.1 – Viscosidade dinâmica do ligante**

Pela observação da Figura 4.1 é visível que com o aumento da temperatura de ensaio, os valores obtidos de viscosidade dinâmica diminuem significativamente, tal como expectável. Verificou-se que a viscosidade dinâmica do ligante, com incorporação de 4% de Sasobit, diminuiu significativamente para uma temperatura de 135°C comparativamente com os restantes ligantes betuminosos com incorporação de aditivos. Ademais, verificou-se que a viscosidade dinâmica do ligante puro, não varia significativamente com o aumento da temperatura de 120°C para 135°C, contrariamente ao comportamento apresentado pelas MBT, em que se regista uma redução bastante significativa da viscosidade dinâmica.

Da análise da Figura 4.1 pode concluir-se que a incorporação de aditivos no ligante betuminoso conduziram à diminuição da viscosidade dinâmica do betume puro, melhorando as propriedades do ligante a baixas temperaturas e, desta forma, a trabalhabilidade da mistura betuminosa.

Com os valores da viscosidade, para as várias temperaturas consideradas, foi possível traçar uma linha de tendência para cada ligante betuminoso, tal como apresenta a Figura 4.2. Desta forma, avaliando o valor do parâmetro  $R^2$  de cada uma das equações apresentadas, pode concluir-se que as linhas de tendência apresentam um bom ajustamento aos resultados, mesmo considerando que o comportamento foi estudado apenas para três temperaturas.

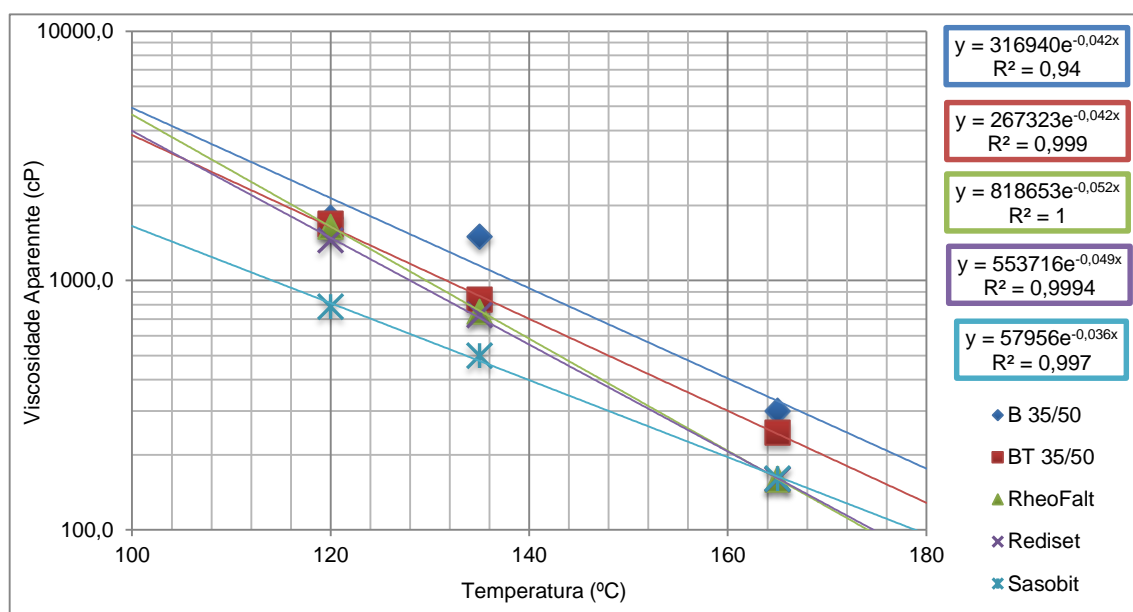


Figura 4.2 - Variação da viscosidade dinâmica em função da temperatura

## 4.2 Características Marshall

### 4.2.1 Enquadramento

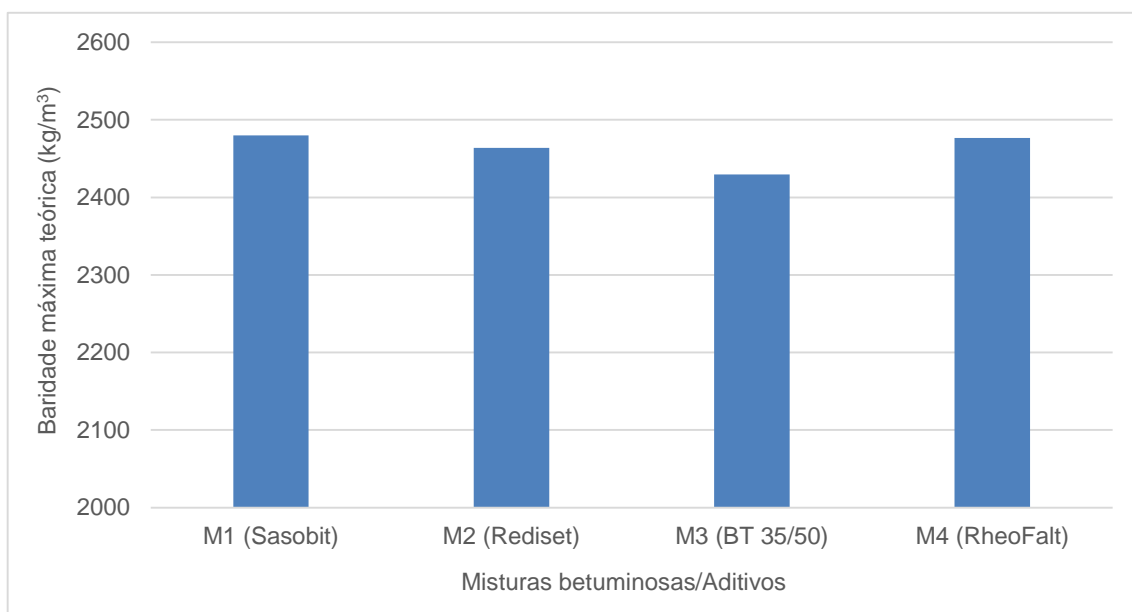
O ensaio de compressão Marshall foi realizado com o intuito de determinar as principais propriedades que caracterizam as misturas betuminosas, para as várias situações estudadas, do ponto de vista da sua resistência: estabilidade e deformação. Contudo, a preparação das misturas e a compactação dos respetivos provetes permitiu avaliar também as propriedades volumétricas (porosidade e VMA) da composição dos materiais a partir da determinação, nomeadamente, da baridade aparente e da baridade máxima teórica. O conhecimento destas características foi considerado útil, de forma a

garantir que as propriedades apresentadas pelas misturas betuminosas cumpriam com os requisitos especificados no CETO [13].

#### 4.2.2 Resultados da baridade máxima teórica

Na determinação da baridade máxima teórica,  $\rho_{mv}$ , como referido anteriormente, foram seguidas as recomendações preconizadas na norma EN 12697-5 [49].

A baridade máxima teórica associada à baridade aparente permitiu calcular a porosidade dos materiais compactados. Os resultados obtidos estão representados na Figura 4.3.



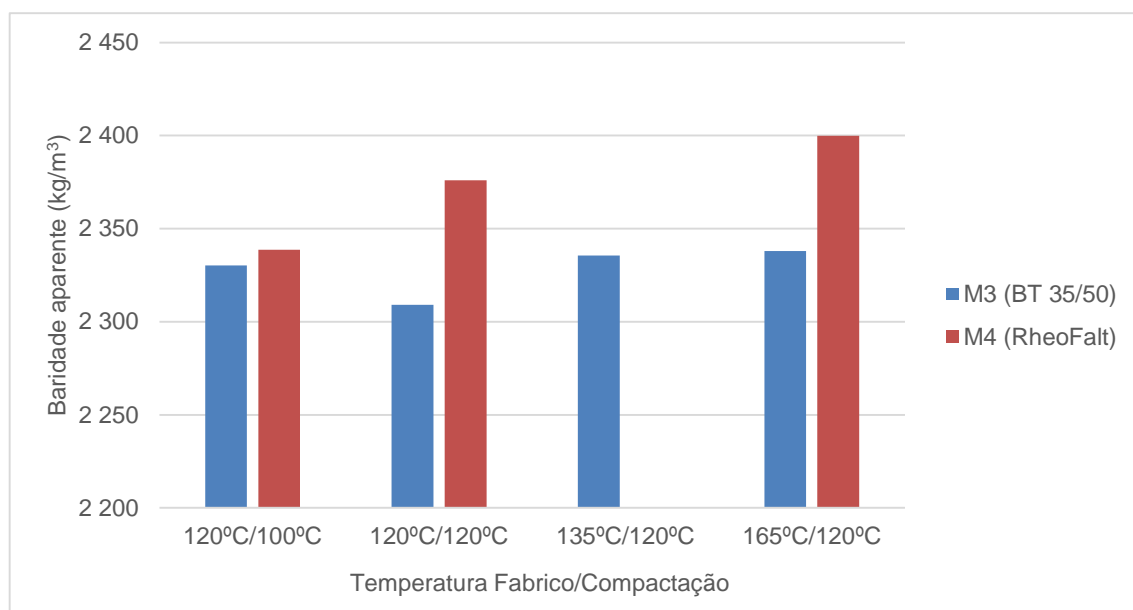
**Figura 4.3 - Baridade máxima teórica das misturas betuminosas**

Os resultados obtidos da baridade máxima teórica apresentam valores muito semelhantes, tal como era expectável porque as composições dos vários materiais (tipo de agregados, curva granulométrica, tipo e percentagem de ligante) são iguais, diferindo apenas nos aditivos incorporados. Apenas se verificou uma redução da baridade máxima teórica da mistura M3 (BT 35/50).

#### 4.2.3 Resultados da baridade aparente

Os resultados obtidos para a baridade aparente relativos às misturas M3 (BT 35/50) e M4 (RheoFalt) podem ser observados na Figura 4.4. Estes foram determinados de acordo com a norma EN 12697-6 [52]. Todos os provetes ensaiados apresentavam  $101,6 \pm 0,1$  mm de diâmetro e  $63,5 \pm 2,5$  mm de altura, conforme o estipulado na norma EN 12697-30 [51]. Note-se que o estudo consistiu na produção e

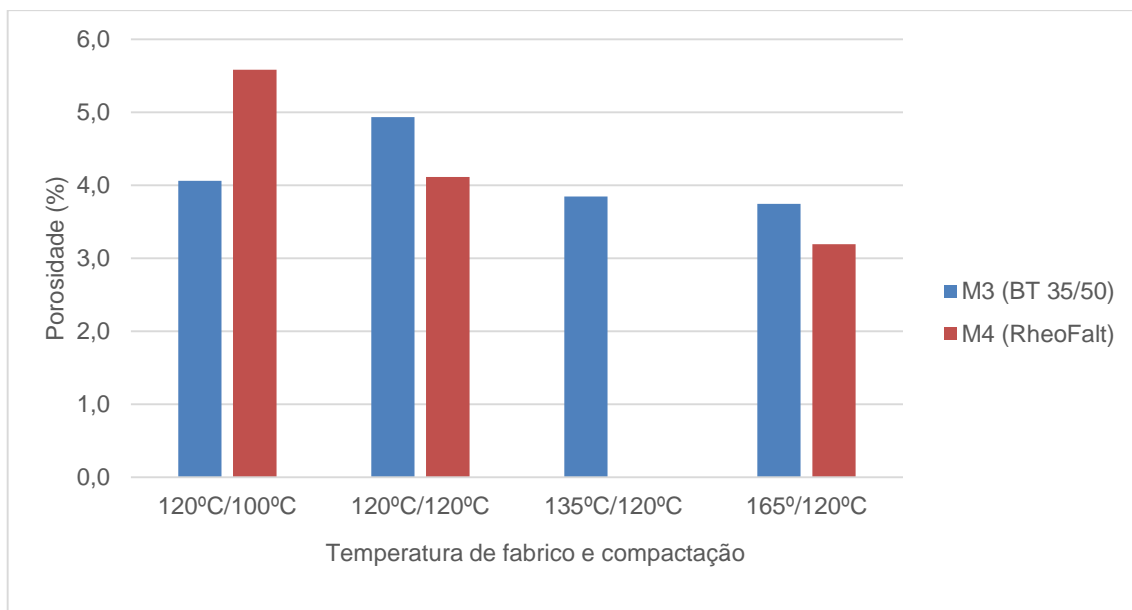
compactação da mistura M3 (BT 35/50) para 4 combinações diferentes de temperaturas, relativamente à mistura M4 (RheoFalt) procedeu-se ao fabrico e compactação para 3 combinações diferentes de temperaturas.



**Figura 4.4 – Baridade aparente das misturas betuminosas**

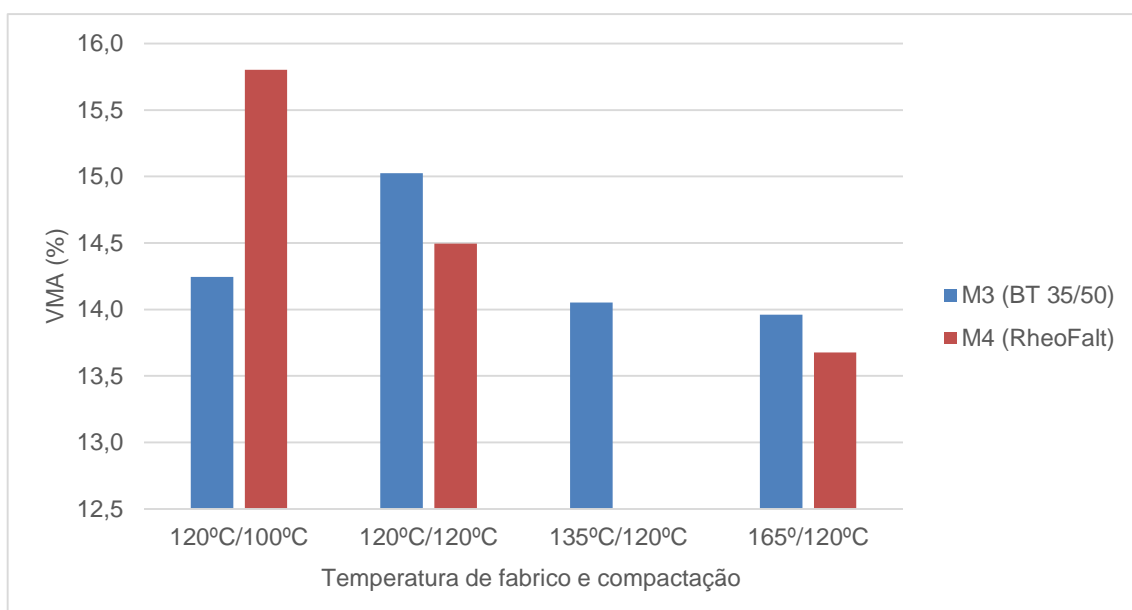
Tendo em conta os resultados apresentados na Figura 4.4, pode-se constatar que os resultados obtidos para a baridade aparente não apresentam grandes variações. Observa-se, no geral, que a baridade aparente da mistura M4 (RheoFalt) foi superior à baridade aparente da mistura M3 (BT 35/50). Desta forma, pode-se concluir que a mistura M4 apresenta uma menor resistência à compactação, o que se traduziu em baridades aparentes superiores e, consequentemente, em porosidades inferiores à mistura M3, como se encontra representado na Figura 4.5, para temperaturas de compactação de 120°C.

Importa referir que para temperaturas de compactação de 100°C, a mistura M4 (RheoFalt) apresentou um valor de baridade semelhante à mistura M3. No entanto, apresentou um valor de porosidade superior à mistura M3, o que demonstra que a diminuição da temperatura de compactação da mistura com incorporação de RheoFalt (M4) resultou numa redução da trabalhabilidade, pelo aumento da resistência à reorganização dos agregados. Os valores obtidos de porosidade cumprem os limites impostos pelo CETO.



**Figura 4.5 - Porosidade dos provetes Marshall**

O volume de vazios na mistura de agregados (VMA) foi calculado com base na baridade máxima teórica e na baridade aparente. Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 4.6.



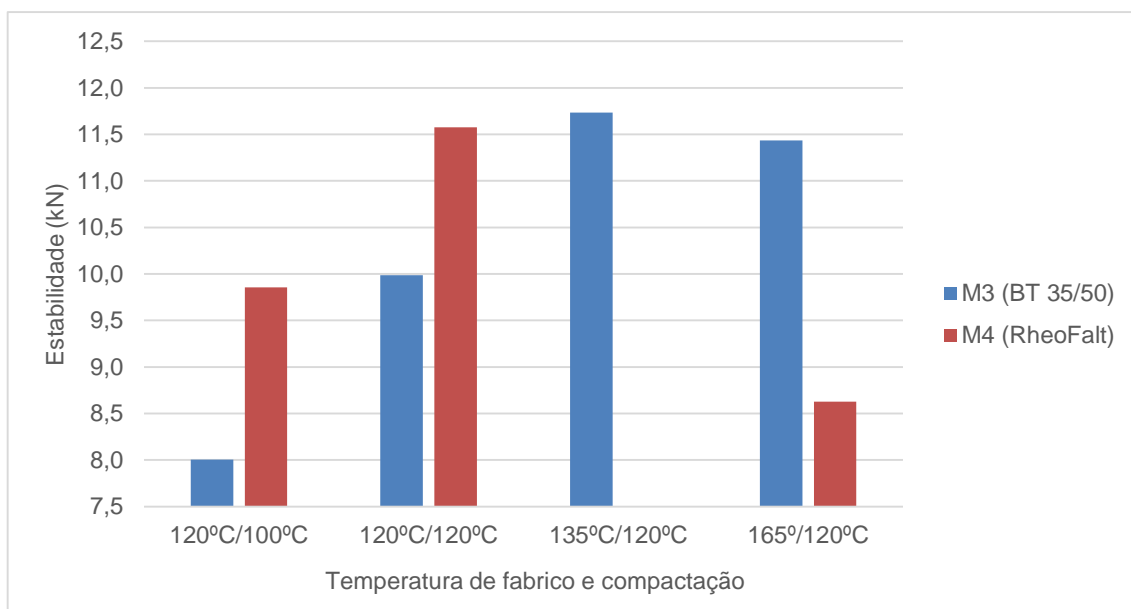
**Figura 4.6 – Volume de vazios na mistura de agregado dos provetes Marshall**

Como se pode observar na Figura 4.6, os valores obtidos para o VMA da mistura M3 (BT 35/50) são superiores aos da mistura M4 (RheoFalt), com exceção dos resultados obtidos para a temperatura de fabrico de 120°C e de compactação de 100°C. Neste caso a mistura M4 (RheoFalt) apresentou um

valor de VMA bastante superior ao resultado registado pela mistura M3 (BT 35/50). É visível também que com o aumento da temperatura de fabrico há uma tendência para a diminuição do VMA. Verifica-se que o valor obtido de VMA pela mistura M4 para uma temperatura de fabrico de 165°C encontra-se fora do limite estabelecido pelo CETO de 14%.

#### 4.2.4 Resultados do ensaio de compressão

O ensaio de compressão Marshall consistiu na determinação da estabilidade do provete, bem como da respetiva deformação na rotura quando submetido às condições de ensaio normalizadas estipuladas na norma EN 12697-34 [54]. Com base nos resultados obtidos do ensaio de compressão Marshall, é possível inferir algumas conclusões sobre o comportamento das MBT em análise. Os resultados obtidos para a força de rotura das misturas apresentam-se na Figura 4.7.

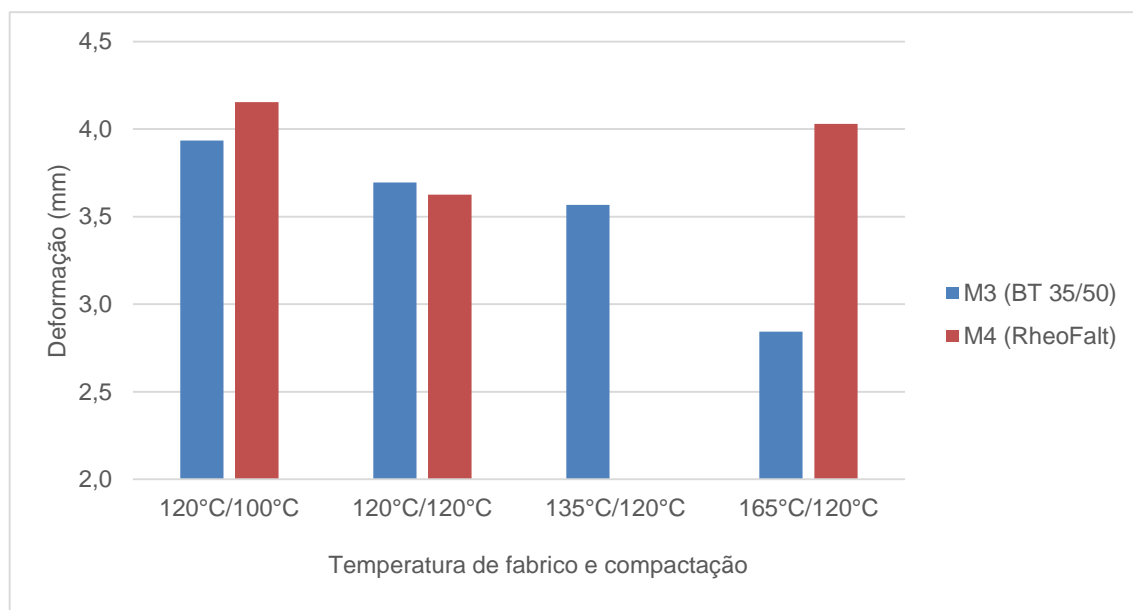


**Figura 4.7 - Variação da estabilidade para as diferentes temperaturas de fabrico e de compactação**

Observando a Figura 4.7, é possível concluir que o valor obtido da estabilidade para uma temperatura de compactação de 100°C é mais reduzido, com maior influência na mistura M3 (BT 35/50). Com o aumento das temperaturas de fabrico e de compactação regista-se também o aumento da estabilidade até se atingir o valor de pico, para as temperaturas de fabrico e de compactação recomendadas pelos produtores, de cada mistura. Ambas as misturas apresentaram um valor de pico semelhante, mas para temperaturas de fabrico diferentes. Note-se que a temperatura de fabrico de 135°C e de compactação de 120°C corresponde às temperaturas recomendadas pelo produtor para a mistura M3 (BT35/50). Relativamente à mistura M4 (RheoFalt) é recomendado pelo produtor uma temperatura de produção e de compactação de 120°C. Desta forma, para as temperaturas de fabrico superiores às recomendadas

pelos respectivos produtores constatou-se uma ligeira diminuição da estabilidade para a mistura M3 e uma redução acentuada para a mistura M4 (RheoFalt). Pelo que pode-se constatar que a mistura M4 deve ser fabricada à temperatura recomendada pelo produtor, caso contrário é comprometido o desempenho final da mistura.

Os resultados obtidos para a deformação referente às misturas M3 (BR 35/50) e M4 (RheoFalt) encontram-se representados na Figura 4.8.



**Figura 4.8 - Variação da deformação para as diferentes temperaturas de fabrico e de compactação**

A Figura 4.8 mostra que, no geral, os valores de deformação obtidos para as misturas M3 (BT35/50) corresponderam a resultados ligeiramente inferiores aos da mistura M4 (RheoFalt), com exceção do valor de deformação obtido para a temperatura de fabrico de 165°C, em que se registou uma redução de deformação acentuada pela mistura M3 comparativamente com a mistura M4. Observa-se, também, que para os menores valores de estabilidade registaram-se as maiores deformações.

Todas as propriedades analisadas no ensaio de compressão Marshall cumpriram os limites estabelecidos no CETO [13]. Desta forma, conclui-se que as MBT estudadas na presente dissertação, misturas M3 (BT 35/50) e M4 (RheoFalt), em termos das propriedades volumétricas e mecânicas, analisadas no ensaio Marshall, apresentaram desempenho similar ao das MBQ.

### 4.3 Caracterização do desempenho das misturas betuminosas

#### 4.3.1 Escorrimento

A avaliação do escorrimento das misturas betuminosas temperadas foi, como referido anteriormente, baseada no ensaio do cesto (*Basket method*), de acordo com os procedimentos estipulados na norma EN 12697-18 [40]. Os ensaios de escorrimento foram realizados a temperatura constante de 135°C e de 180°C. No Quadro 4.1 encontram-se os resultados obtidos.

**Quadro 4.1 - Resultados obtidos do ensaio do escorrimento das misturas betuminosas**

Mistura / Aditivo	Temperatura de ensaio (°C)	D (%)
<b>M1</b> <b>Sasobit</b>	135	0
	180	0
<b>M2</b> <b>Rediset</b>	135	0
	180	0
<b>M3</b> <b>BT 35/50</b>	135	0
	150	0
	180	0
<b>M4</b> <b>RheoFalt</b>	135	0
	180	0

No Quadro 4.1 é possível observar que o escorrimento das misturas betuminosas temperadas é sempre nulo, independentemente das temperaturas de ensaio e do tipo de aditivo utilizado. Assim pode concluir-se que as MBT apresentaram um bom comportamento a este ensaio. O presente ensaio teve como objetivo estudar o comportamento ao escorrimento das misturas betuminosas temperadas em análise, visto que os aditivos incorporados nas misturas betuminosas influenciam o comportamento reológico do ligante betuminoso, pois são responsáveis pela diminuição da viscosidade e pela boa trabalhabilidade da mistura. Constatou-se que as misturas betuminosas apresentaram um bom comportamento face ao escorrimento o que se considera um indicador favorável ao transporte e ao espalhamento da mistura betuminosa em obra.



### 4.3.2 Sensibilidade à água

Na avaliação da sensibilidade à água foram seguidos os procedimentos definidos nas normas EN 12697-12 [37] e EN 12697-23 [55].

Previamente à realização do ensaio de sensibilidade à água, determinou-se também a baridade aparente dos provetes fabricados de acordo com a norma EN 12697-6 [52]. O Quadro 4.2 apresenta as características volumétricas correspondentes aos provetes sujeitos ao ensaio de sensibilidade à água.

**Quadro 4.2 - Características dos provetes sujeitos ao ensaio de sensibilidade à água**

Mistura/Aditivo	Temperatura Fabrico / Compactação	Características					
		Altura (mm)		Baridade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )		Porosidade (%)	
		Provetes Secos	Provetes Húmidos	Provetes Secos	Provetes Húmidos	Provetes Secos	Provetes Húmidos
<b>M1 Sasobit</b>	120°C/100°C	63,5	64,7	2398	2387	3,3	3,8
	120°C/120°C	64,3	64,7	2384	2382	3,9	4,0
	165°C/120°C	65,2	65,7	2333	2323	6	6,3
<b>M2 Rediset</b>	120°C/100°C	64,3	65,1	2378	2355	3,5	4,4
	120°C/120°C	62,6	63,0	2405	2399	2,4	2,7
	165°C/120°C	65,8	65,8	2330	2324	5,5	5,7
<b>M3 BT 35/50</b>	120°C/100°C	64,2	65,3	2332	2322	4	4,4
	120°C/120°C	64,4	65,6	2302	2282	5,3	6,0
	135°C/120°C	65,1	65,6	2354	2345	3,1	3,4
	165°C/120°C	66,0	65,5	2332	2328	4	4,2
<b>M4 RheoFalt</b>	120°C/100°C	65,6	65,5	2346	2324	5,3	6,2
	120°C/120°C	63,8	63,1	2378	2375	4	4,1
	165°C/120°C	64,0	63,8	2413	2406	2,6	2,9

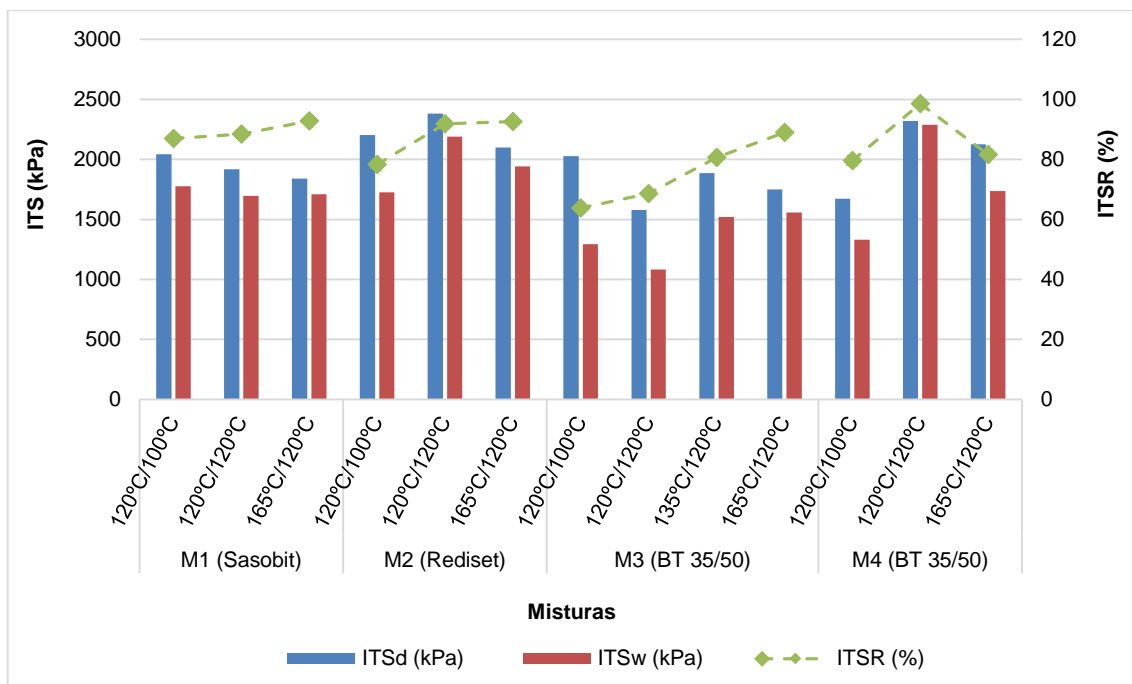
Todos os provetes sujeitos ao ensaio de sensibilidade à água apresentaram dimensões dentro do intervalo de  $101,9 \pm 0,1$  mm, de diâmetro, e  $63,5 \pm 2,5$  mm, de altura, conforme estipula a norma EN 12697-30 [51].

Analisando o Quadro 4.2, verifica-se que os provetes apresentam, aproximadamente as mesmas dimensões e baridade, sendo que a diferença de alturas médias e de baridades médias entre o grupo de provetes “secos” e “molhados” não excedeu, respetivamente, 5 mm e  $15 \text{ kg/m}^3$ , conforme o estipulado na norma.

Por observação do Quadro 4.2 os valores obtidos para a baridade aparente das misturas M3 (BT 35/50) e M4 (RheoFalt) não diferiram dos resultados obtidos da baridade dos provetes de Marshall, o que confirma a coerência das características dos provetes dos vários ensaios e permite estabelecer com maior confiança a comparação de resultados. Os valores de baridade aparente, registados pelos provetes constituídos pela mistura M4, foram ligeiramente superiores aos resultados de baridade dos provetes da mistura M3. Pode, também, constatar-se que os valores obtidos para a baridade aparente dos provetes compactados não apresentaram grande variação entre eles, bem como o valor das alturas dos provetes.

Os resultados obtidos de porosidade não variaram de forma significativa entre os vários provetes. Embora as características de compactação tenham sido iguais, naturalmente que os resultados obtidos são dependentes da temperatura de fabrico e de compactação o que conduziu a porosidades diferentes.

Na Figura 4.9 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação da resistência conservada no ensaio de tração indireta, para as misturas estudadas para as diversas temperaturas de fabrico e de compactação, realizados na presente dissertação. Os resultados de cada ensaio de sensibilidade à água são apresentados no Anexo D.



**Figura 4.9 - Variação das resistências à tração indireta**

Da análise da Figura 4.9, verifica-se que a resistência conservada em tração indireta, para as temperaturas recomendadas pelos fabricantes, apresentou bons resultados: aproximadamente 80%. Segundo a análise dos resultados obtidos, verifica-se que os provetes que apresentaram maior baridade aparente, e conseqüentemente menor porosidade, apresentam também maior resistência conservada em tração indireta.

A diminuição da temperatura de fabricação da mistura M3 (BT 35/50) provocou uma diminuição da resistência conservada em tração indireta acentuada, registrando um valor de 69%.

Os resultados de ITSR obtidos para a mistura M1 (Sasobit) mantiveram-se, na generalidade, sensivelmente constantes. O mesmo aconteceu para a mistura M2 (Rediset) que registou valores superiores a 90%, com exceção da temperatura de compactação de 100°C, em que se verificou uma redução do valor de ITSR apresentando um resultado de 73%.

O resultado obtido de resistência conservada para a mistura M4 (RheoFalt) para temperatura de fabricação de 120°C e de compactação de 120°C, foi superior aos resultados obtidos por todas as outras misturas, registrando um valor de 99%.

Em geral, foi possível constatar que as MBT estudadas na presente dissertação apresentaram um bom desempenho ao ensaio de sensibilidade à água, nomeadamente, quando fabricadas e compactadas às temperaturas recomendadas.

#### **4.3.3 Resistência à deformação permanente**

O ensaio de resistência à deformação permitiu avaliar a suscetibilidade à deformação dos materiais betuminosos. Este ensaio foi realizado segundo a norma EN 12697-22 [38]. Tal como referido anteriormente, no presente trabalho foi adotado o procedimento B, realizado com recurso ao equipamento pequeno e acondicionamento ao ar.

Para a realização do ensaio, segundo este procedimento, foram necessários 2 provetes prismáticos, tendo sido aplicados 10 000 ciclos de carga. O ensaio foi dado como concluído após terem sido aplicados os 10 000 ciclos de carga ou para uma profundidade de rodeira de 20 mm. Previamente à realização do ensaio, estipulou-se efetuar leituras a cada 250 ciclos de carga.

Relativamente aos provetes ensaiados, de acordo com o Procedimento B, os principais resultados obtidos do ensaio de resistência à deformação permanente foram a Taxa de Deformação Média ao ar – *Wheel Tracking Slope in air* ( $WTS_{AIR}$ ), a percentagem da profundidade média de rodeira dos dois provetes ensaiados – *Mean Proportional Rut Depth in air* ( $PRD_{AIR}$ ) e a média da profundidade de rodeira atingida no fim do ensaio – *Mean Rut Depth in air* ( $RD_{AIR}$ ).

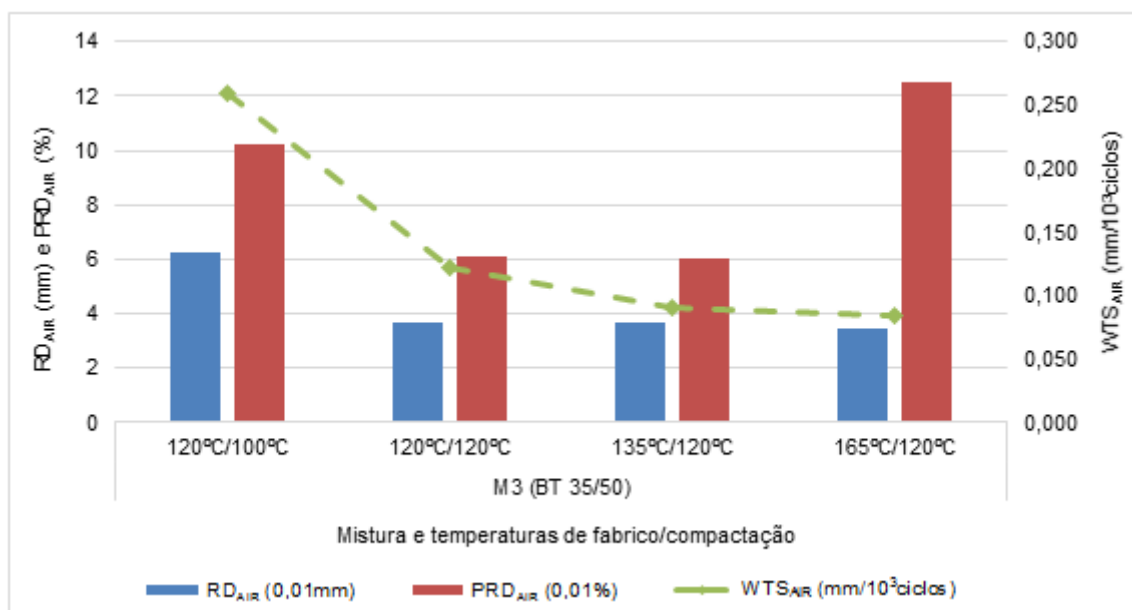
Para a realização deste ensaio foram produzidas séries de duas lajes, a partir das misturas M3 (BT 35/50) e M4 (RheoFalt) para diferentes temperaturas de fabrico e compactação, com dimensões de 400 × 300 × 60 mm. A temperatura de ensaio foi de 60°C, como preconizado na norma EN 12697-22 [38]. Desta forma, foram fabricadas 14 lajes (8 da mistura M3 e 6 da mistura M4). Os resultados obtidos dos ensaios à deformação permanente estão apresentados no Quadro 4.3.

**Quadro 4.3 - Características volumétricas das lajes ensaiadas**

Mistura/Aditivo	Nº Laje	Temperatura Fabrico / Compactação	Propriedades			
			Massa (g)	Baridade Aparente (kg/m³)	Baridade Geométrica (kg/m³)	Porosidade (%)
<b>M3 (BT 35/50)</b>	1	120°C/100°C	17240	2315	2336	5,1
	2		17265	2288	2351	6,2
	1	120°C/120°C	17182	2266	2359	6,7
	2		17230	2281	2364	6,5
	1	135°C/120°C	17271	2290	2354	6,1
	2		17232	2292	2366	6,0
	1	165°C/120°C	17212	2288	2364	6,3
	2		17231	2298	2310	5,9
<b>M4 (RheoFalt)</b>	1	120°C/100°C	16370	2291	2237	6,0
	2		16250	2309	2278	5,3
	1	120°C/120°C	16337	2286	2241	6,0
	2		16339	2278	2266	6,4
	1	165°C/120°C	17019	2318	2348	4,9
	2		16987	2308	2335	5,3

Analisando o Quadro 4.3, constata-se que todas as misturas M3 (BT 35/50) apresentaram valores de massa semelhantes, devido à quantidade de mistura introduzida no molde ser a mesma. Pretendeu-se desta forma evidenciar o efeito das diferentes temperaturas de produção e de compactação na resistência à deformação permanente. O mesmo aconteceu para as misturas M4 (RheoFalt). Da análise do Quadro 4.3, observa-se que a mistura M3 (BT 35/50) apresentou valores de baridade aparente equivalentes aos da mistura M4 (RheoFalt).

Na Figura 4.10 apresentam-se graficamente os resultados obtidos nos ensaios. Os resultados de cada ensaio de resistência à deformação permanente são apresentados no Anexo E.



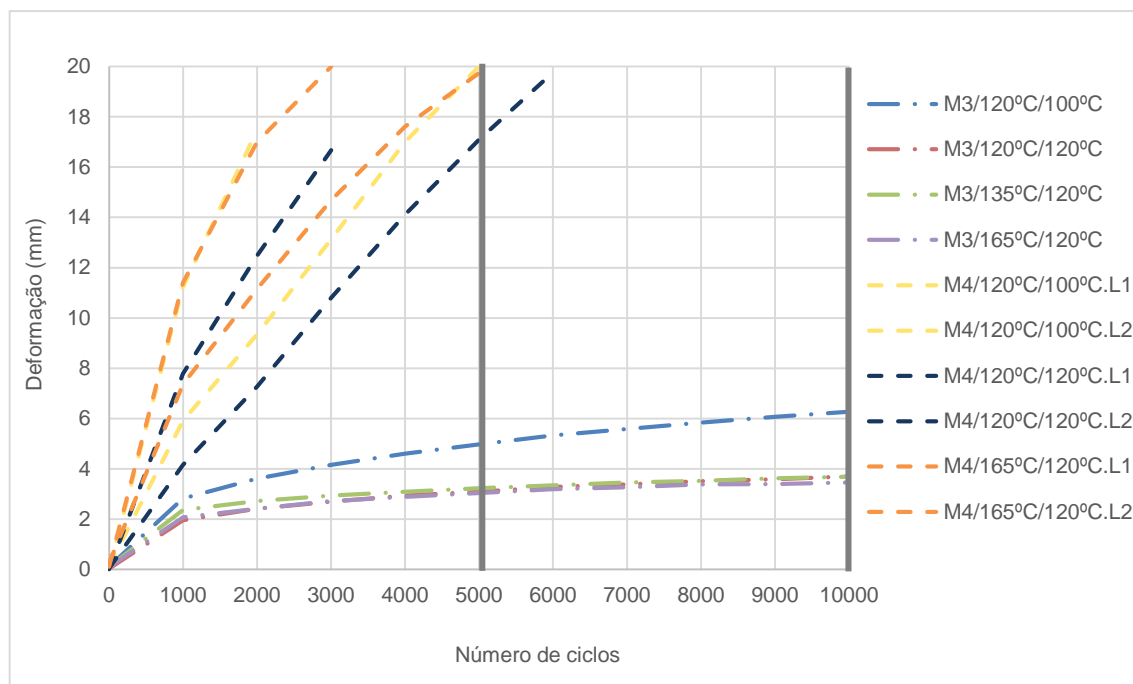
**Figura 4.10 - Comparação dos resultados médios dos provetes obtidos no ensaio de resistência à deformação permanente para a mistura M3 (BT35/50)**

Os resultados obtidos no ensaio de deformação permanente, relativos à mistura M4 (RheoFalt) não se encontram representados graficamente na Figura 4.10. Tal deveu-se ao facto dos ensaios não terem sido concluídos, por ter sido atingida a profundidade máxima de rodeira (20 mm) antes dos 10 000 ciclos de carga. Desta forma, conclui-se que a mistura betuminosa com incorporação de RheoFalt (M4) apresentou um desempenho insatisfatório neste ensaio. Os melhores resultados ao ensaio de deformação permanente foram obtidos pela mistura M3 (BT 35/50) para as temperaturas de fabrico de 165°C e de 135°C e para temperatura de compactação de 120°C.

Pela análise da Figura 4.10, verifica-se que a resistência à deformação permanente das misturas diminui com a diminuição da temperatura de produção e de compactação, pelo que a laje fabricada a 120°C e compactada a 100°C teve uma deformação ligeiramente superior à das restantes lajes da mistura M3 (BT35/50). No geral, a mistura M3 (BT 35/50) apresentou um bom desempenho ao ensaio de deformação permanente.

Na Figura 4.11 encontra-se o desenvolvimento das rodeiras de cada laje ensaiada à deformação permanente. Os provetes constituídos pela mistura M4 (RheoFalt) apresentaram um desenvolvimento de rodeira bastante diferenciado para cada laje ensaiada, desta forma optou-se por representar graficamente o comportamento de cada laje ensaiada, evidenciando assim o comportamento insatisfatório da mistura com incorporação de RheoFalt. Os provetes constituídos pela mistura M3 (BT35/50) apresentaram o mesmo comportamento à deformação permanente, pelo que se optou por

representar graficamente os resultados médios de cada série de duas lajes obtidos nos ensaios de resistência à deformação permanente, como se pode observar na Figura 4.11.



**Figura 4.11 - Representação gráfica do desenvolvimento da rodeira durante o ensaio de deformação permanente**

A Figura 4.11 permite distinguir, para a mistura M3 (BT 35/50), duas fases distintas da evolução da deformação permanente. Na primeira fase o acréscimo de deformação por carregamento é elevado, devido à densificação da camada betuminosa pela aplicação repetida de cargas. Esta densificação da camada betuminosa contribuiu para o aumento da resistência à deformação permanente pois aumentou o contacto entre os agregados. Assim a mistura suportou as cargas sem que ocorresse mais redução de volume. Numa segunda fase, o acréscimo de deformação permanente foi menor, apresentando um acréscimo, praticamente linear, com o número de carregamentos, devido a tensões de corte a volume constante. Comparando o desenvolvimento da rodeira das misturas M3 representadas graficamente na Figura 4.11 com a Figura 4.12, são evidentes as semelhanças das duas primeiras fases [56]. A mistura M3 não contemplou a terceira fase, em que ocorre rotura do provete. Nesta última fase o acréscimo de deformação por carregamento aumenta drasticamente.

Relativamente à mistura M4 (RheoFalt) a distinção das três fases de evolução da deformação permanente foi evidente. Os provetes não concluíram o ensaio de resistência à deformação permanente por terem excedido o valor máximo estipulado para a profundidade de rodeira (20 mm). Desta forma, o ensaio foi terminado antes dos 10 000 ciclos de carga. Após a densificação da camada

betuminosa do provete, primeira fase, deu-se um aumento drástico do acréscimo de deformação por carregamento, entrando-se, desta forma no domínio das grandes deformações por corte, o que consiste na terceira fase [56].

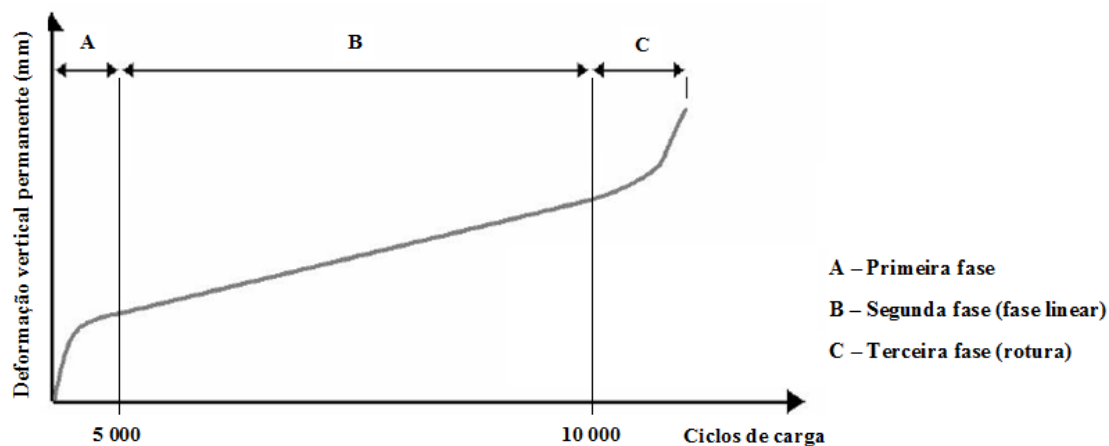


Figura 4.12 - Fases da evolução da deformação permanente em misturas betuminosas [56]

#### 4.4 Análise comparativa com outras misturas para a camada de base

No presente capítulo foi feita uma análise comparativa dos desempenhos das MBT estudadas na presente dissertação com o Estudo 2 apresentado no subcapítulo 2.5 designado: “Estudos realizados no âmbito das misturas betuminosas temperadas”.

Para a análise comparativa dos ensaios de sensibilidade à água e de deformação permanente selecionou-se do Estudo 2 a mistura betuminosa convencional (MBC) e duas MBT, com incorporação dos aditivos Sasobit e Rediset, do tipo AC 20 base 35/50 [16]. As propriedades volumétricas e mecânicas obtidas no ensaio Marshall para as misturas, referidas anteriormente, encontram-se no Quadro 4.4, assim como para as misturas estudadas na presente dissertação (M3 e M4).



**Quadro 4.4 - Propriedades obtidas do ensaio Marshall para as misturas em análise**

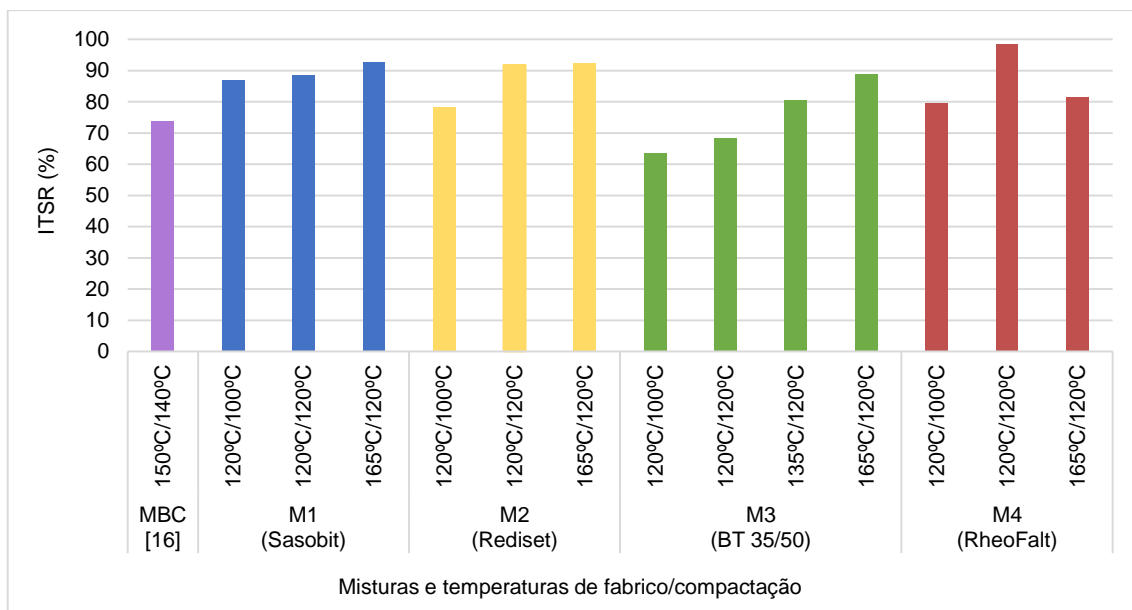
Mistura/Aditivo	Temperatura de Fabrico / Compactação	Baridade (kg/m <sup>3</sup> )	Baridade máxima teórica (kg/m <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	VMA (%)	Estabilidade (kN)	Deformação (mm)
<b>M3 (BT 35/50)</b>	120°C/100°C	2330	2429	4,1	14,2	8	3,9
	120°C/120°C	2309	2429	4,9	15	10	3,7
	135°C/120°C	2336	2429	3,8	14,1	11,7	3,6
	165°C/120°C	2338	2429	3,7	14	11,4	2,8
<b>M4 (RheoFalt)</b>	120°C/100°C	2339	2477	5,6	15,8	9,9	4,2
	120°C/120°C	2376	2477	4,1	14,5	11,6	3,6
	165°C/120°C	2400	2477	3,2	13,7	8,6	4,0
<b>MBC [16]</b>	150°C/140°C	2394	2495	4,2	14,4	12,2	3,7
<b>MBT Sasobit [16]</b>	120°C/100°C	2310	2443	5,4	15,5	11,1	4,3
<b>MBT Rediset [16]</b>	120°C/100°C	2299	2416	4,9	14,9	10,8	4,6

Da análise do Quadro 4.4 pode-se concluir que para as temperaturas de fabrico e de compactação, recomendadas pelos produtores, isto é, no caso da mistura M3 (BT35/50) produzida a 135°C e compactada a 120°C, e a mistura M4 (RheoFalt) produzida a 120°C e compactada a 120°C, as propriedades volumétricas e mecânicas destas misturas betuminosas temperadas são análogas às da mistura betuminosa convencional (MBC) e às das MBT, com incorporação de Sasobit e de Rediset, estudadas no Estudo 2 [16].

- **Ensaio de sensibilidade à água**

A análise comparativa do ensaio de sensibilidade à água foi realizada com base na mistura betuminosa convencional (MBC) apresentada no Estudo 2 [16].

Na Figura 4.13 apresentam-se graficamente os resultados obtidos nos ensaios de sensibilidade à água para as misturas a comparar.

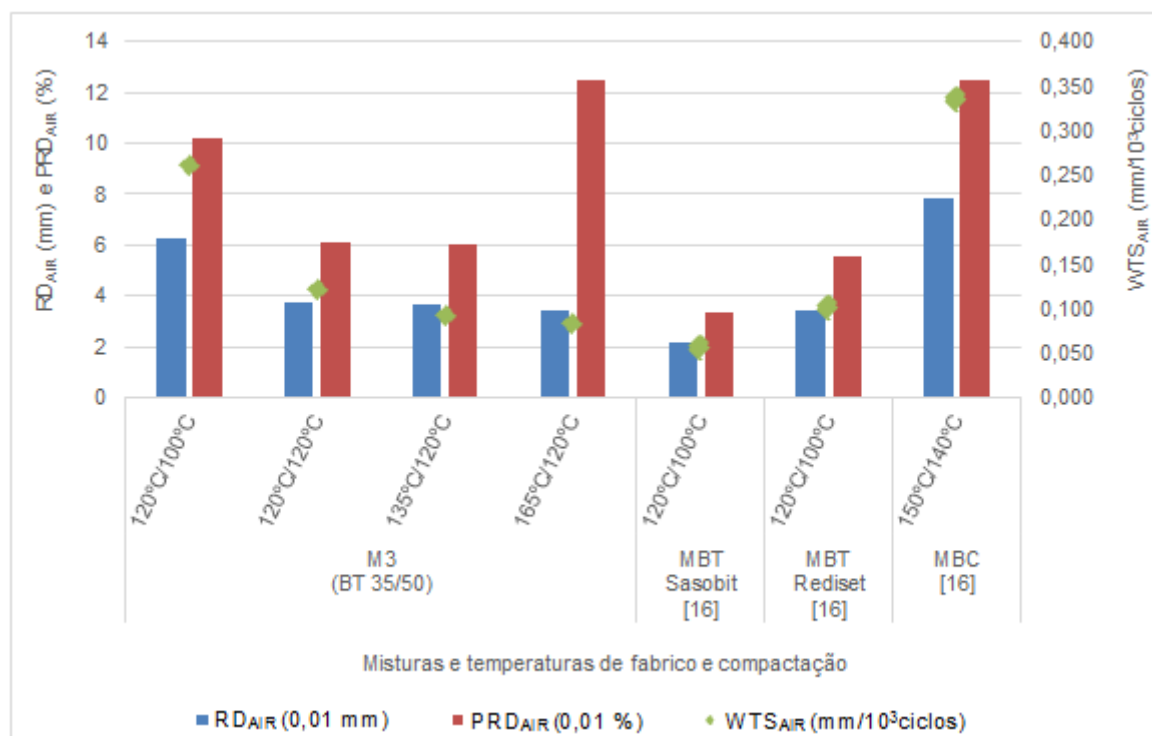


**Figura 4.13 - Resultados obtidos nos ensaios de sensibilidade à água**

A análise da Figura 4.13 permite concluir que as MBT estudadas na presente dissertação (M1, M2, M3 e M4) apresentaram melhor comportamento, para as temperaturas recomendadas pelos produtores, do que a mistura betuminosa convencional (MBC) apresentada no Estudo 2 [16]. Recordando-se que o principal objetivo da presente análise comparativa é compreender de que forma a incorporação de diferentes aditivos influencia o desempenho das misturas comparativamente com as MBC, pode-se afirmar que as MBT estudadas na presente dissertação apresentaram, no geral, melhor desempenho que a MBC, no que diz respeito ao ensaio de sensibilidade à água.

- **Ensaio de deformação permanente**

A análise comparativa do ensaio de deformação permanente foi realizada com base na MBC, nas MBT, com incorporação de Sasobit e Rediset, apresentadas no Estudo 2 [16] e caracterizadas anteriormente pelo ensaio Marshall, e na mistura M3 (BT 35/50) estudada na presente dissertação. Na Figura 4.14 apresentam-se graficamente os resultados obtidos nos ensaios realizados.



**Figura 4.14 - Resultados obtidos nos ensaios de deformação permanente**

Analisando a Figura 4.14, verifica-se que a mistura betuminosa convencional (MBC) apresentada no Estudo 2 [16] apresentou as maiores deformações comparativamente às MBT, registando um valor de 7,8 mm. A mistura betuminosa que apresentou menor deformação foi a mistura betuminosa com incorporação de Sasobit apresentada no Estudo 2 [16], que registou uma deformação de 2,17 mm. Os resultados obtidos para a mistura com incorporação de Rediset foram semelhantes aos resultados obtidos para a mistura M3 (BT 35/50), para as temperaturas de fabrico de 165°C e de 135°C. A Figura 4.14 não apresenta os resultados obtidos para a mistura M4 porque, como já foi referido anteriormente, esta mistura apresentou um comportamento insatisfatório no ensaio de resistência à deformação permanente. Constatou-se que os ensaios não foram concluídos, por ter sido atingida a profundidade de rodeira (20mm) antes dos 10 000 ciclos de carga.

Desta forma, com base nos resultados obtidos e na presente análise comparativa entre uma mistura betuminosa convencional (MBC) e a mesma mistura com diferentes tecnologias de produção de MBT, foi possível concluir sobre potencial das misturas betuminosas temperadas para camada de base.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

O objetivo principal deste trabalho centrou-se na investigação do efeito da variação das temperaturas de fabrico e de compactação no comportamento da MBT selecionada para efeito. Para tal, realizou-se um vasto estudo experimental de uma mistura betuminosa do tipo AC 20 base 35/50 com incorporação de diferentes aditivos, e produzida e compactada a várias temperaturas.

A seleção adequada das temperaturas de fabrico e compactação de MBT é um aspeto muito importante e que carece ainda de melhor conhecimento, pois trata-se também de uma tecnologia recente e de menor aplicação corrente. Desta forma, considerou-se fundamental estudar o efeito das temperaturas, de modo a garantir a mesma qualidade durante os processos de produção e compactação, e o mesmo desempenho em serviço que as misturas convencionais, sendo que com maiores vantagens, porque são utilizadas menores temperaturas de fabrico/compactação.

Tendo em conta os objetivos específicos estabelecidos para compreender o efeito das temperaturas de fabrico e de compactação, foi realizado um trabalho experimental com incidência no comportamento do betume e no da mistura betuminosa. Em relação ao comportamento reológico do betume, avaliou-se o efeito dos diferentes aditivos através da medição da viscosidade dinâmica. De forma a garantir o bom desempenho das misturas M3 (BT35/50) e M4 (RheoFalt) efetuou-se o ensaio Marshall para diferentes temperaturas de fabrico e de compactação e compararam-se as propriedades volumétricas e mecânicas. Verificou-se que as MBT em análise cumprem os limites definidos no CETO. O desempenho da mistura betuminosa foi avaliado através do ensaio de escorrimento, de deformação permanente e de sensibilidade à água.

Com base nos resultados obtidos e da análise efetuada, considera-se que foram atingidos os objetivos estabelecidos para a presente dissertação. As principais conclusões deste trabalho são:

- As temperaturas de fabrico e de compactação tiveram um papel preponderante no desempenho das misturas betuminosas. Com efeito: a temperatura de fabrico é fundamental, por forma a garantir a viscosidade própria do ligante betuminoso para que este envolva adequadamente os agregados durante o processo de fabrico; a temperatura de compactação contribuirá para a melhor organização das partículas de agregado revestidas de betume; e, globalmente, a mistura betuminosa atingirá uma adequada porosidade compatível com a coesão e resistência necessárias para suportar as ações a que irá estar sujeita em serviço no pavimento.

- Os valores do ensaio de escorrimento foram sempre nulos, independentemente das temperaturas de ensaio e do tipo de aditivo utilizado. Assim, pode concluir-se que este não é um aspeto com preocupação para as MBT e, que o transporte e a aplicação da MBT não parecem comprometer, à partida, a melhor homogeneidade que é necessária para a camada final no pavimento.
- Do ponto de vista da resistência das MBT à presença da água, os ensaios de sensibilidade à água mostraram um efeito claro das temperaturas de fabrico em todos os casos: os melhores resultados foram obtidos para as temperaturas sugeridas pelo produtor (valores de *ITSR* superiores a 80%). Constatou-se que todos os provetes ensaiados apresentaram grandes áreas deformadas próximas da zona de carregamento e uma linha de quebra limitada. O subconjunto “húmido” de provetes apresentava maiores deficiências de ligante no revestimento do agregado, o que confirma que a ligação do ligante betuminoso com o agregado não é tão eficaz devido ao tipo de acondicionamento destes provetes. Em todos os provetes ensaiados foi observada a presença de agregado fraturado.
- Em relação à resistência à deformação permanente, avaliada em ensaio de pista, constatou-se um comportamento diferenciado: a mistura betuminosa M3 (BT 35/50) evidenciou um bom desempenho, tendo sido observado que as rodeiras atingidas no final dos ensaios se encontravam no intervalo de 2,97 mm a 6,47 mm; relativamente à mistura M4, esta apresentou um desempenho insatisfatório por não ter completado o ensaio (foi atingida a profundidade de rodeira de 20 mm antes de ter sido completado os 10 000 ciclos de carga). Acresce ainda, que este tipo de comportamento mostrou ser independente das temperaturas de fabrico e de compactação.

Em suma, com a realização deste estudo experimental pode concluir-se que a produção de MBT com incorporação de aditivos não compromete o comportamento em serviço do pavimento desde que sejam utilizadas as temperaturas adequadas para esse tipo de mistura. Desta forma, pode concluir-se sobre o potencial de aplicação futura das misturas betuminosas temperadas na prática construtiva, atendendo aos benefícios a nível económico, social e ambiental que se procuraram evidenciar no presente trabalho. Pretende-se, desta forma contribuir para um melhor conhecimento do comportamento das misturas estudadas, pelo facto das tecnologias utilizadas na produção das MBT serem relativamente recentes.

## 5.2 Desenvolvimentos futuros

O presente trabalho permitiu um melhor conhecimento sobre o desempenho das MBT, quando fabricadas e compactadas a diversas temperaturas. Com base nos resultados obtidos, e tendo em

consideração os benefícios decorrentes da utilização deste tipo de tecnologia de produção de misturas betuminosas é expectável a sua utilização industrial cada vez maior. Contudo, como se trata de uma tecnologia recente, é importante que haja uma evolução futura da investigação nesta área. Desta forma, procura-se de seguida sugerir algumas linhas orientadoras para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Considera-se interessante a avaliação do desempenho das misturas betuminosas a longo prazo, com recurso a processos de envelhecimento de misturas betuminosas;
- Com o objetivo de aprofundar o comportamento das MBT analisadas no presente trabalho, e de até dar continuidade direta ao mesmo, sugere-se a avaliação de outras características do desempenho como por exemplo a resistência à fadiga;
- Considera-se interessante também a aplicabilidade das MBT em outras camadas do pavimento, como por exemplo na camada de desgaste;
- Tendo como base um espectro mais amplo de conhecimento sobre as MBT, sugere-se o desenvolvimento de uma metodologia de formulação específica para as MBT com aplicação e divulgação a nível nacional;
- Considera-se de grande interesse, a quantificação do consumo de combustíveis e das emissões para a atmosfera proveniente da aplicação de MBT em detrimento das MBQ.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Branco, F.; Pereira, P.; Picado-Santos, L. - *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, Coimbra, 2011.
- [2] D'Angelo, J.; Harm, E.; Bartoszek, J.; Baumgardner, G.; Corrigan, M.; Cowser, J. - *Warm-Mix asphalt: European Practice*. Federal Highway Administration, AASHTO, NCHRP, Report no. PL-08-007, Alexandria, 2008.
- [3] Newcomb, D. - *An introduction to warm-mix asphalt*. National Asphalt Pavement Association, 2007.
- [4] Capitão, S.; Picado-Santos, L.; Martinho, F. - *Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt*. Construction and Building Materials, vol. 36, págs. 1016–1024, Elsevier, 2012.
- [5] Martinho, F.; Picado-Santos, L.; Capitão, S.; Neves, J. - *Avaliação Do Desempenho De Misturas Betuminosas Temperadas Contendo MBR*. 7º Congresso Rodoviário Português do Centro Rodoviário Português, Lisboa, 2013.
- [6] Button, J.; Estakhri, C.; Wimsatt, A. - *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*. Texas Transportation Institute and Federal Highway Administration. Report FHWA/TX-07/0-5597-1, Texas, 2007.
- [7] European Asphalt Pavement Association - *The Use of Warm Mix Asphalt*, Holanda, 2010.
- [8] Zaumanis, M. - *Warm Mix Asphalt Investigation*. Dissertação de Mestrado, Technical University of Denmark, Dinamarca, 2010.
- [9] Santos, A. - *Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- [10] Lopes, R. - *Fabrico e compactação de misturas betuminosas temperadas*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.

- [11] Martinho, F. - *Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação Tecnológica*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2014.
- [12] Silva, H. - *Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique: contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, 2005.
- [13] Estradas de Portugal S.A. – *Caderno de Encargos Tipo Obra - 14.03 Pavimentação. Características dos Materiais*. Almada, 2012.
- [14] Ferreira, C. - *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2009.
- [15] Vaitkus, A.; Ziliute, L. - *The Research on the use of warm mix asphalt for asphalt pavement structured*. Road Department, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius 2009.
- [16] Alves, M. - *Estudo do desempenho de materiais alternativos na pavimentação rodoviária - O caso das Misturas Betuminosas Temperadas*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [17] Croteau, J.; Tessier, B. - *Warm mix asphalt paving technologies: a road builder's perspective*. Annual Conference of Transportation Association of Canada, Toronto, 2008.
- [18] The Asphalt Pavement Association of Oregon - *Warm Mix Asphalt*. Consultada efetuada em 8 de Junho de 2015: [http://www.apao.org/warm\\_mix\\_asphalt.html](http://www.apao.org/warm_mix_asphalt.html).
- [19] Carvalho, T.; Barreno, I. – *Ligantes Betuminoso Temperados*. 7º Congresso Rodoviário Português do Centro Rodoviário Português, Lisboa, 2013.
- [20] Chowdhury, A; Button, J. - *A Review of Warm Mix Asphalt*. The Texas A&M University System, Texas, 2008.
- [21] Gameiro, A. - *Produção de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados : Compactabilidade e Comportamento Mecânico*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

- [22] Barnes, H.; Hutton, J.; Walters, K. – *An Introduction to Rheology*. Amesterdão, Elsevier, 1989.
- [23] Hurley, G.; Prowell, B. – *Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, 2005.
- [24] Sasol Wax GmbH Company - *Sasobit Handling and Blending Guideline*. Obtido em 8 de Junho de 2015: de <http://www.sasolwax.us.com/pdf/SasobitHandling-BlendingGuidelineUSA.pdf>
- [25] Sasol Wax GmbH Company - *Sasobit Technology*. Consulta efetuada em 8 de Junho de 2015: <http://www.sasolwax.com/en/Applications/Bitumen+Modification/Europe/Sasobit+Technology.html?hig>
- [26] Ventraco Chemie B.V. - *Low Temperature Asphalt - RheoFalt LT-70*. Consulta efetuada em 9 de Março de 2015: <http://www.ventraco.nl/uk-en/additives/low-temperature-asphalt>
- [27] Ventraco Chemie B.V. - *Ficha de Segurança - RheoFalt LT-70*. Consulta efetuada em 9 de Março de 2015: <http://www.ventraco.nl/nl-nl/datasheets>
- [28] Sanchez-Alonso, E.; Castro-Fresno, D.; Vega-Zamanillo, A.; Rodriguez-Hernandez, J. - *Sustainable asphalt mixes: use of additives and recycled materials*. Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, págs 249-257, 2011.
- [29] Hasan, Z.; Hamid, B.; Amir, I.; Danial, N. - *Long term performance of warm mix asphalt versus hot mix asphalt*. School of Civil Engineering Iran University of Science and Tecnology, Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Theran, 2013.
- [30] Redondo, S.; León, J.; Alonso, E. - *Estudio del ángulo de contacto de betunes aditivados y su efecto sobre distintas propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas*. Revista Carreteras, nº 178, págs 253–264, 2011.
- [31] Read, J.; Whiteoak, D. - *The Shell Bitumen Handbook*. Thomas Telford, Londres, 2003.
- [32] Yildirim, Y.; Solaimanian, M.; Kennedy, T. - *Calculation of Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt concrete*. Report no.1250-5, University of Texas, Austin, 2000.
- [33] Micaelo, R. - *Compactação de misturas betuminosas*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

- [34] Federal Highway Administration's - *Superpave Mixture, Design Guide, WesTrack Forensic Team Consensus Report*. Washington, 2001.
- [35] West, R.; Watson, D.; Turner, P.; Casola J. - *Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt*. National Cooperative Highway Research Program, Report no. 648, Transportation Research Board, Washington D.C., 2010.
- [36] Asphalt Institute - *Laboratory Mixing and Compaction Temperatures for Asphalt Binders*. Asphalt Institute Technical Bulletin. Lexington, 2012.
- [37] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-12 – *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous*. Bruxelas, 2008.
- [38] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 12697-22 - *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel tracking*. Bruxelas, 2007.
- [39] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - NP EN 13108-1 - *Misturas betuminosas – Especificações dos materiais. Parte 1: Betão Betuminoso*. Tradução da EN 13108-1, Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica, 2011.
- [40] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12697-18 – *Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 18: Binder drainage*. Bruxelas, 2004.
- [41] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - NP EN 13043 – *Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação*. Tradução da EN 13043, Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica, 2004.
- [42] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – NP EN 933-1 – *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*. Tradução da EN 933-1, Instituto Português da Qualidade (IPQ). Caparica, 2000.
- [43] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12591 – *Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens*. Bruxelas, 2009.

- [44] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) – EN 13302 - *Bitumen and bituminous binders. Determination of viscosity of bitumen using a rotating simple apparatus*. Bruxelas, 2003.
- [45] Testo AG - *Testo 905-T1 - Sonda de penetração*. Consulta efetuada em 3 Julho de 2015: <http://www.testo.pt/produto/0560+9055/testo-905-T1-Sonda-de-penetracao>
- [46] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12594 - *Bitumen and bituminous binders. Preparation of test samples*. Bruxelas, 2007.
- [47] J. P. Selecta S.A. - *SELECTA ST-2020-R Rotacional Viscosimeters Instruction Manual Code 80239*. Selecta Group, Barcelona, 2011.
- [48] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12697-35 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 35: Laboratory mixing*. Bruxelas, 2004
- [49] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12697-5 - *Bituminous Mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 5: Determination of the maximum density*. Bruxelas, 2002.
- [50] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12697-33 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor*. Bruxelas, 2003.
- [51] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12697-30 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 30: Specimen prepared by impact compactor*. Bruxelas, 2004.
- [52] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12697-6 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*. Bruxelas, 2003.
- [53] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12697-8 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. Bruxelas, 2003.
- [54] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12697-34 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 34: Marshall test*. Bruxelas, 2004.

- [55] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) - EN 12697-23 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of indirect tensile strength of bituminous specimens*. Bruxelas, 2004.
- [56] Gardete, D. – *Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente*. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra, 2006.

## ANEXO A – CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DOS AGREGADOS

Quadro A 1 - Percentagem de material passado

Peneiros	% MATERIAL PASSADO			
	Fíler Comercial	Pó de Pedra 0/4mm	Brita 1 6/12mm	Brita 2 12/20mm
Série Base + Série 2 (mm)				
31,5	100	100	100	100
20	100	100	100	96
16	100	100	100	52
14	100	100	100	27
12,5	100	100	97	12
10	100	100	71	2
8	100	100	39	1
6,3	100	100	12	1
4	100	95	2	1
2	100	63	1	1
1	100	37	1	1
0,5	100	23	1	1
0,125	99	10	1	1
0,063	83,5	7,8	0,7	0,5





# ANEXO B – DECLARAÇÕES DE DESEMPENHO DOS AGREGADOS

**eurocálcio**  
CALCÁRIOS E INERTES, SA

FICHA TÉCNICA DO PRODUTO Nº01 - Rev.10

**CE 1029**

EUROCÁLCIO - Calcários e Inertes, SA  
Vale de Ourém, S. Mamede - Apartado 96 - 2496-908 Fátima  
Centro de Produção: Fábrica "Vale de Ourém"

06	05
NP EN 13043:2004/AC:2010 Agregados Misturas Betuminosas CCPF Nº 1029 - CPD - PT06/01944	NP EN 12620:2002+A1:2010 Agregados para Betão CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01472
NP EN 13139:2005/AC:2010 Agregados para Argamassas CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01473	

**Desig. Comercial: RC 480**

Caracterização	Betão	Mist. Betuminosas	Argamassas
Tipo de agregado	Filer	Filer	Filer
<b>REQUISITOS FÍSICOS</b>			
Qualidade dos Finos - Azul Metileno	VD *1 MBs 2g/kg	VD *1 MBs 10	VD *1 NR
Massa Volumétrica das partículas	VD *1 2.71 Mg/m³	VD *1 2.71±0.1 Mg/m³	VD *1 2.71 Mg/m³
Teor de Humidade	NA	VD *1 < 0.5 %	NA
Vazios do filer seco compactado (Rigden)	NA	DND	NA
"Variação da temperatura anel e bola"	NA	DND	NA
Solubilidade na Água	NA	VD *1 < 0.2%	NA
Susceptibilidade à Água	NA	DND	NA
"Número de betume"	NA	DND	NA
Superfície Específica - Método Blaine	VD *1 3690 cm²/g	NA	VD *1 0,00%
Durabilidade: Reactividade Alcalis-Silica	VD *1 0,00%		
<b>REQUISITOS QUÍMICOS</b>			
Teor de Cloretos	VD *1 < 0.001%	NA	VD *1 < 0.001%
Sulfatos solúveis em ácido	C *1 ASs2	NA	C *1 ASs2
Enxofre total	VD *1 < 0.04%	NA	VD *1 < 0.04%
Teor de húmus	VD *1 mais claro	NA	VD *1 mais claro
Teor de Carbonato	CO <sub>2</sub> 44±1%	NA	NA
	CaCO <sub>3</sub> 99±1%	NA	NA
<b>Descrição Petrográfica Simplificada *R</b>	<b>Agregado</b>	<b>Minerais</b>	<b>Forma e Angulosidade</b>
	Fragmentos de rocha	Calcário	Forma: subprismático a subdiscoidal Angulosidade: muito anguloso a subanguloso
			<b>Condições de superfície</b>
			Rugosa

Nota: Produto obtido a partir de pedra natural, pelo que está sujeito a algumas variações (cor) resultantes do processo de formação da própria pedra.

**GRANULOMETRIA**

Malha (mm)	Granulometria Típica (%)	Tolerâncias	
		Valor Mínimo	Valor Máximo
2	100	100	100
0.125	99	98	100
0.063	83.5	78.5	88.5

**Fuso Granulométrico**

LEGENDA: \*R - Ensaio Regular C - categoria DND - Desempenho não determinado NA - não aplicável  
\*1 - Ensaio inicial VD - valor declarado NR - Não Requerido

Elaborou: Aprovou: Data: 30-04-2012

1/1

Figura B 1 - Características do filer RC480

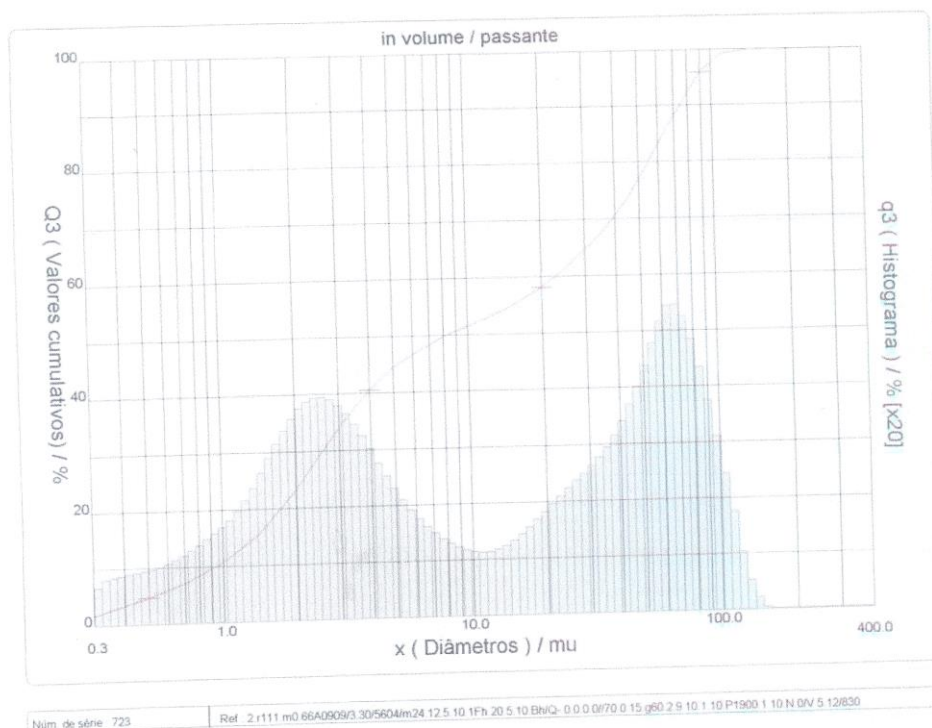
## CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30  $\mu$ m - 400.00  $\mu$ m / 30 Classes

Ref da amostra	: RC 480	Ultrasom	: 60	s
Type produit	: FILER	Concentração	: 212	
Client	: TEXSA	Diâmetro a 10%	: 0.93	$\mu$ m
Comentários	: L5	Diâmetro a 50%	: 8.31	$\mu$ m
Líquido	: Água	Diâmetro a 90%	: 74.39	$\mu$ m
Agente dispersante	: Nenhum	Fraunhofer		
Operador	: MANUEL	Densidade/Fator		
Empresa	: Eurocalcio	Superfície específica		
Localização	: Fátima	Diluição automática	: Não / Não	
Data	: 01-04-2014	Medida./Limp.	: 60/60/6	
Hora	: 08:02:18	SOP	: MarcCE	
Índice med.	: 5604			

Valores cumulativos particulares								in volume / passante	
x	40.00	63.00	100.0	125.0	150.0	160.0	180.0	200.0	
Q3	70.50	84.78	97.96	99.85	100.00	100.00	100.00	100.00	

x : diâmetro /  $\mu$ m    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %



**Figura B 2 - Distribuição granulométrica do fíler RC480**

Código de identificação único do produto tipo: Agregado 0/4 (Pó de Pedra).

Utilizações previstas: Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil; Misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

Fabricante: José Marques Gomes Galo, SA  
Apartado 1003  
Zambujal – 2971-908 Sesimbra

Sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho (AVCP): Sistema 2+

Norma harmonizada: EN 12620:2002+A1:2008 - Agregados para Betão;  
EN 13043:2002+AC:2004 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

Organismo Notificado: SGS-ICS – Serviços Internacionais de Certificação  
Certificado nº 1029-CPR-PT05/01510

## Desempenho Declarado

Descrição Petrográfica:		Cálculo compacto de grão fino de cor branca acinzentada, pertencente ao Jurássico Superior	
Distribuição Granulométrica		EN 12620	EN 13043
Categoria Granulométrica		G <sub>85</sub>	G <sub>90</sub>
Peneiro Intermediário		NA	G <sub>10</sub>
Série base + Série 2	Granulometria Típica		
Peneiro <sup>21</sup> (mm)	% Passada	Limite Inferior	Limite Superior
31,5	100		
20,0	100		
16,0	100		
14,0	100		
12,5	100		
10,0	100		
8,0	100	100	100
6,3	100	98	100
4,0	95	90	100
2,0	63	53	73
1,0	37	17	57
0,500	23		
0,250	15	5	35
0,125	10		
0,063	7,8	4,8	10,8

Outras Características do produto		EN 12620	EN 13043
Massa Volúmica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )		2,72 ± 0,05	
Massa Volúmica das partículas saturadas com a superfície seca ao ar (Mg/m <sup>3</sup> )		2,69 ± 0,05	
Massa Volúmica das partículas secas em estufa (Mg/m <sup>3</sup> )		2,67 ± 0,05	
Absorção de água (%)		WA <sub>24</sub> 1,2%	WA <sub>24</sub> 2
Teor de finos		f <sub>16</sub>	NA
Qualidade dos Finos: Azul de Metileno		MB4	MB <sub>10</sub>
Percentagem de partículas esmagadas		NA	C <sub>1000</sub>
Resistência à abrasão		NA	AAV <sub>100</sub>
Resistência ao desgaste provocado por pneus pitonados		A <sub>10</sub> NR	A <sub>10</sub> NR
Resistência ao choque térmico		NA	NPD
Retração por secagem <sup>21</sup>		≤0,030%WS	NA
Teor de Cloretos		≤0,001%CI	NA
Sulfatos Solúveis em Ácido		AS <sub>23</sub>	NA
Constituintes que alteram o tempo de presa e a resistência à compressão		≤120min	NA
Reactividade Alcalis-Silica		Classe I	NA
Enxofre total		≤1%S	NA
Angulosidade do agregado fino		NA	E <sub>10</sub> NR
Teor de Carbonatos		≥42%CO <sub>2</sub> ≥96%CaCO <sub>3</sub>	NA
Teor de Húmus		Isento	NA
Contaminantes Orgânicos Leves		≤0,1%	m <sub>1,0</sub> 0,1
Composição química		NA	NPD
Substâncias Perigosas		NPD	NPD
Resistência ao gelo/degelo do agregado grosso		NA	F <sub>100</sub>
Afinidade do Agregado grosso com o ligante betuminoso		NA	NPD
Bandade (Mg/m <sup>3</sup> )		[1,46 ; 1,52]	

<sup>21</sup>Abertura quadrada dos peneiros em mm

Valores em Percentagem passada Acumulada

NA Não aplicável

NPD Desempenho Não Determinado

<sup>21</sup>Valor determinado num agregado com a mesma origem

O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados.  
A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o Regulamento (EU) n.º 305/2011, sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado acima.

Assinado por e em nome do Fabricante por:

Clélia Galo  
Sesimbra, 20 de Fevereiro de 2015

FG.02.40 (02)

16-06-2014

Pág. 1/1

**Figura B 3 - Declaração de desempenho do pó de pedra 0/4mm**



## Declaração de Desempenho

Nº 03 – Agregado 6/12



1029  
05

Código de identificação único do produto tipo: Agregado 6/12 (Brita 1).

Utilizações previstas: Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil; Misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

Fabricante: José Marques Gomes Galo, SA  
Apartado 1003  
Zambujal – 2971-908 Sesimbra

Sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho (AVCP): Sistema 2+

Norma harmonizada: EN 12620:2002+A1:2008 - Agregados para Betão

EN 13043:2002+AC:2004 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Organismo Notificado: SGS-ICS – Serviços Internacionais de Certificação  
Certificado nº 1029-CPR-PT05/01510

### Desempenho Declarado

Descrição Petrográfica:		Cálculo compacto de grão fino de cor branca acinzentada, pertencente ao Jurássico Superior	
Distribuição Granulométrica		EN 12620	EN13043
Categoria Granulométrica		G <sub>0</sub> :85/20	G <sub>0</sub> :90/20
Peneiro Intermédio		NA	G <sub>25</sub> +15
Série base + Série 2	Granulometria Típica		
Peneiro <sup>4)</sup> (mm)	% Passada	Limite Inferior	Limite Superior
63,0	100		
40,0	100		
31,5	100		
20,0	100	100	100
16,0	100	98	100
14,0	100	90	100
12,5	97		
10,0	71		
8,0	39	25	54
6,3	12	0	20
4,0	2	0	5
2,0	1		
1,0	1		
0,500	1		
0,250	1		
0,125	1		
0,063	0,7	0,0	1,5

Outras Características do produto		EN 12620	EN13043
Massa Volumétrica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )		2,70 ± 0,05	
Massa Volumétrica das partículas saturadas com a superfície seca ao ar (Mg/m <sup>3</sup> )		2,68 ± 0,05	
Massa Volumétrica das partículas secas em estufa (Mg/m <sup>3</sup> )		2,67 ± 0,05	
Absorção de água (%)		WA <sub>0,6</sub> 0,6%	WA <sub>0,6</sub> 1
Teor de finos		f <sub>1,5</sub>	f <sub>2</sub>
Índice de Achatamento		Fl <sub>100</sub>	Fl <sub>100</sub>
Índice de Forma		Sl <sub>40</sub>	Sl <sub>100</sub>
Resistência à fragmentação <sup>5)</sup>		LA <sub>10</sub>	
Resistência ao desgaste <sup>6)</sup>		M <sub>10</sub> 20	
Porcentagem de partículas esmagadas		NA	C <sub>100/0</sub>
Resistência à Abrasão		NA	AAV <sub>100</sub>
Resistência à Abrasão provocada por Pneus Pitonados		A <sub>10</sub> NR	A <sub>10</sub> NR
Resistência ao Choque Térmico		NA	NPD
Retração por secagem <sup>7)</sup>		≤0,030%WS	NA
Resistência ao Polimento		PSV <sub>100</sub>	PSV <sub>100</sub>
Teor de Cloretos <sup>8)</sup>		≤0,001%Cl	NA
Constituintes que alteram o tempo de presa e a resistência à compressão <sup>9)</sup>		≤120min	NA
Sulfatos Solúveis em Ácido <sup>10)</sup>		AS <sub>10</sub> 2	NA
Reatividade Alcalina-Silica <sup>11)</sup>		Classe I	NA
Enxofre Total <sup>12)</sup>		≤1%	NA
Teor de Carbonatos <sup>13)</sup>		≥42%CO <sub>2</sub> ≥96%CaCO <sub>3</sub>	NA
Teor de Conchas do Agregado Grosso		SC <sub>100</sub>	NA
Teor de Humus <sup>14)</sup>		Isento	NA
Contaminantes Orgânicos Leves <sup>15)</sup>		≤0,1%	m <sub>1,1</sub> ≤0,1
Composição Química		NA	NPD
Substâncias Perigosas		NPD	NA
Resistência ao Gelo/Degelo do Agregado Grosso		F <sub>100</sub>	F <sub>100</sub>
Afinidade do Agregado Grosso com o ligante betuminoso		NA	NPD
Baridade (Mg/m <sup>3</sup> )		[1,38 - 1,39]	

<sup>4)</sup> Abertura quadrada dos peneiros em mm

Valores em Percentagem passada Acumulada

NA Não aplicável

NPD Desempenho Não Determinado

<sup>15)</sup> Valor determinado num agregado com a mesma origem

O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados.

A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o Regulamento (EU) n.º 305/2011, sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado acima.

Assinado por e em nome do Fabricante por:

Clelia Galo

Sesimbra, 20 de Fevereiro de 2015

FG.02.40 (02)

16-06-2014

Pág. 1/1

Figura B 4 - Declaração de desempenho da brita 6/12mm



Código de identificação único do produto tipo: Agregado 12/20 (Brita 2).

Utilizações previstas: Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil; Misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.

Fabricante: José Marques Gomes Galo, SA  
Apartado 1003  
Zambujal – 2971-908 Sesimbra

Sistema de avaliação e verificação da regularidade do desempenho (AVCP): Sistema 2+

Norma harmonizada: EN 12620:2002+A1:2008 - Agregados para Betão  
EN 13043:2002+AC:2004 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Organismo Notificado: SGS-ICS – Serviços Internacionais de Certificação  
Certificado nº 1029-CPR-PT05/01510

Desempenho Declarado

Descrição Petrográfica:		Calcário compacto de grão fino de cor branca acinzentada, pertencente ao Jurássico Superior	
Distribuição Granulométrica		EN 12620	EN13043
Categoria Granulométrica		G <sub>0</sub> :85/20	G <sub>0</sub> :85/20
Peneiro Intermediário		NA	NA
Série base + Série 2	Granulometria Típica		
Peneiro <sup>a)</sup> (mm)	% Passada	Limite Inferior	Limite Superior
63,0	100		
40,0	100	100	100
31,5	100	98	100
20,0	96	85	100
16,0	52		
14,0	27		
12,5	12	0	20
10,0	2		
8,0	1		
6,3	1	0	5
4,0	1		
2,0	1		
1,0	1		
0,500	1		
0,250	1		
0,125	1		
0,063	0,5	0,0	1,5

<sup>a)</sup> Abertura quadrada dos peneiros em mm

Valores em Percentagem passada Acumulada

Outras Características do produto		EN 12620	EN13043
Massa Volumica do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )		2,71 ± 0,05	
Massa Volumica das partículas saturadas com a superfície seca ao ar (Mg/m <sup>3</sup> )		2,69 ± 0,05	
Massa Volumica das partículas secas em estufa (Mg/m <sup>3</sup> )		2,67 ± 0,05	
Absorção de água (%)	WA <sub>24</sub> 0,6%	WA <sub>24</sub> 1	
Teor de finos	f <sub>15</sub>	f <sub>15</sub>	
Índice de Achatamento		FI <sub>15</sub>	
Índice de Forma		SI <sub>15</sub>	
Resistência à fragmentação <sup>b)</sup>		LA <sub>30</sub>	
Resistência ao desgaste <sup>b)</sup>		M <sub>20</sub> 20	
Percentagem de partículas esmagadas	NA	C <sub>100/0</sub>	
Resistência à Abrasão	NA	AAV <sub>100</sub>	
Resistência à Abrasão provocada por Pneus Pitonados	A <sub>10</sub> NR	A <sub>10</sub> NR	
Resistência ao Choque Térmico	NA	NPD	
Retração por secagem <sup>b)</sup>	≤0,030%WS	NA	
Resistência ao Polimento	PSV <sub>100</sub>	PSV <sub>100</sub>	
Teor de Cloretos <sup>b)</sup>	≤0,001%Cl	NA	
Constituintes que alteram o tempo de presa e a resistência à compressão <sup>b)</sup>	≤120min	NA	
Sulfatos Solúveis em Ácido <sup>b)</sup>	AS <sub>1,2</sub>	NA	
Reactividade Alcalis-Silica <sup>b)</sup>	Classe I	NA	
Enxofre Total <sup>b)</sup>	≤1%S	NA	
Teor de Carbonatos <sup>b)</sup>	≥42%CO <sub>2</sub>	NA	
Teor de Conchas do Agregado Grosso	SC <sub>100</sub>	NA	
Teor de Húmus <sup>b)</sup>	Isento	NA	
Contaminantes Orgânicos Leves <sup>b)</sup>	≤0,1%	m <sub>1,0</sub> 0,1	
Composição Química	NA	NPD	
Substâncias Perigosas	NPD	NA	
Resistência ao Gelo/Degelo do Agregado Grosso	F <sub>100</sub>	F <sub>100</sub>	
Afinidade do Agregado Grosso com o ligante betuminoso	NA	NPD	
Bandade (Mg/m <sup>3</sup> )		[1,36 ; 1,43]	

NA Não aplicável

NPD Desempenho Não Determinado

<sup>b)</sup> Valor determinado num agregado com a mesma origem

O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados.  
A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o Regulamento (EU) n.º 305/2011, sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado acima.

Assinado por e em nome do Fabricante por:

Célia Galo

Sesimbra, 20 de Fevereiro de 2015

Figura B 5 - Declaração de desempenho da brita 12/20mm



# ANEXO C – FICHAS TÉCNICAS DOS BETUMES



CEPSA PORTUGUESA PETRÓLEOS, S.A.  
CONTROLO QUALIDADE/LABORATORIO  
Instalações de Matosinhos  
Lugar da Marinha - 4450-905 Matosinhos  
Telefones: 229395500 Fax: 229375621

## CERTIFICADO DE ANALISE

PRODUTO: BETUME ASFALTICO 35/50  
DATA: 29-05-2015  
COD. PRODUTO: 701560000  
DATA DE EMISSÃO: 01-06-2015  
TANQUE 351

ENSAIO	MÉTODO	RESULTADO	LIMITES		UNIDADE
			MIN	MAX	
Penetração 25°C, 100gr, 5 seg	EN 1426	47	35	50	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	EN 1427	51,4	50	58	°C

	VISCOSIDADES	TEMPERATURAS
Gama de Fabrico de Misturas (Recomendado)	170 ± 20 cSt	162 A 166°C
Gama de Compactação de Misturas (Recomendado)	280 ± 30 cSt	152 A 156°C

### OBSERVAÇÕES:

As características acima indicadas obedecem à Especificação EN 12591 de Abril de 2009, emitida pelo CEN – Comité Europeu de Normalização.  
Este Certificado só pode ser reproduzido na íntegra, salvo autorização expressa do Laboratório.  
Os ensaios referem-se exclusivamente à amostra ensaiada.

O TECNICO DO LABORATORIO

O CHEFE DO LABORATORIO

CEPSA PORTUGUESA PETRÓLEOS, S.A.  
Emprego fiscal n.º PT 500513295 01 Matosinhos  
Laboratório autorizado n.º PT 01 500513295  
Operador registado n.º PT 02 500513295

J.1

Figura C 1 - Ficha técnica do Betume 35/50



## CEPSASFALT BT 35/50

### DEFINITION:

Asphalt bitumen, especially designed to work at lower temperatures during production and application of the bituminous mix, which complies with the specifications in the national annex of the standard UNE EN 12591 for the bitumen 35/50.

### CHARACTERISTICS:

Characteristic	Unit	Standard	MIN	MAX
Fresh binder				
Penetration(25 °C)	0,1 mm	EN 1426	35	50
Penetration index	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Softening point (R&B)	°C	EN 1427	50	58
Fraass point	°C	EN 12593	-	-5
Solubility in xylene	%	EN 12592	99,0	-
Flash point	°C	EN ISO 2592	240	-
Resistance to hardening at 163 °C (EN 12607-1)				
Mass loss	%	EN 12607-1	-	0,5
Retained penetration	%	EN 1426	53	-
Increase in softening point (R&B)	°C	EN 1427	-	11

### RECOMMENDED WORKING TEMPERATURES (\*):

- Minimum mixing temperature (°C): 125
- Binder temperature(°C): 155-160
- Minimum compaction temperature (°C): 120

(\*) Depending on the characteristics of the mix

### APPLICATIONS:

- Warm mixes
- Mixes with long transportation times or long application times in the worksite
- Conventional mixes

Revision nº: 0

Approved: 14/10/2011

Next revision: 14/10/2013

Figura C 2 - Ficha técnica do Betume Temperado 35/50



## ANEXO D – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE SENSIBILIDADE À ÁGUA

Quadro D 1 - Resultados obtidos dos ensaios de sensibilidade à água

Mistura/Aditivo	Temperatura Fabrico/Compactação (°C)	Resistência (kPa)		ITSR (%)
		ITS <sub>d</sub> (kPa)	ITS <sub>w</sub> (kPa)	
<b>M1 Sasobit</b>	120°C/100°C	2043	1777	87
	120°C/120°C	1918	1697	88
	165°C/120°C	1841	1709	93
<b>M2 Rediset</b>	120°C/100°C	2203	1726	78
	120°C/120°C	2383	2189	92
	165°C/120°C	2098	1943	93
<b>M3 BT 35/50</b>	120°C/100°C	2028	1293	64
	120°C/120°C	1578	1082	69
	135°C/120°C	1887	1521	81
	165°C/120°C	1750	1557	89
<b>M4 RheoFalt</b>	120°C/100°C	1671	1330	80
	120°C/120°C	2322	2290	99
	165°C/120°C	2126	1736	82



## ANEXO E – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Quadro E 1 - Resultados obtidos dos ensaios de resistência à deformação permanente

Mistura/Aditivo	Nº Laje	Temperatura Fabrico / Compactação	RD <sub>AIR</sub> (0,01mm)	PRD <sub>AIR</sub> (0,01%)	WTS <sub>AIR</sub> (mm/103ciclos)
<b>M3</b> <b>(BT 35/50)</b>	1	120°C/100°C	6,47	10,52	0,264
	2		6,07	9,92	0,256
	1	120°C/120°C	3,72	6,13	0,124
	2		3,68	6,06	0,120
	1	135°C/120°C	3,62	5,92	0,082
	2		3,75	6,18	0,100
	1	165°C/120°C	3,95	6,51	0,088
	2		2,97	4,78	0,080
	1	120°C/100°C	(1)	(1)	(1)
	2		(1)	(1)	(1)
<b>M4</b> <b>(RheoFalt)</b>	1	120°C/120°C	(1)	(1)	(1)
	2		(1)	(1)	(1)
	1	165°C/120°C	(1)	(1)	(1)
	2		(1)	(1)	(1)

<sup>(1)</sup> Ensaios que não foram concluídos, por ter sido atingida a profundidade máxima de rodeira (20mm).